

Aplicação de Algoritmos Genéticos na Elaboração de Horários Escolares: o estudo do caso Inteliway

Autoria: Francisco Sobreira Netto

Resumo

O presente estudo objetiva conhecer, investigar e analisar as vantagens e desvantagens do uso da técnica dos Algoritmos Genéticos em sistemas automatizados na solução do problema de construção da grade ou horário escolar, em uma rede de ensino secundário, conhecido como *School Timetabling*. A construção de horários escolares consiste em arranjar encontros entre professores, turmas e alunos, em um período de tempo determinado, de modo a atender um conjunto de restrições de diversos tipos. No âmbito das instituições de ensino o problema é em geral solucionado de forma manual baseado na experiência pessoal adquirida por coordenadores da grade escolar requerendo, na maioria das ocasiões, muito esforço e tempo, podendo chegar a duas semanas de trabalho. O problema de *School Timetabling* é antigo. Existem referências da década de 60, que descrevem propostas de solução inicialmente bastante restritas. Mais recentemente, várias propostas de equacionamento do problema surgiram com o uso de técnicas da área de Inteligência Artificial. O presente estudo é classificado, considerando seu objetivo, como exploratório, com o desenvolvimento de uma pesquisa qualitativa de caráter descritivo, revestida de natureza bibliográfica e documental, com o uso do método do estudo do caso Inteliway. O sistema automatizado estudado aplica um procedimento de pesquisa de soluções de problemas inspirado nos princípios de seleção natural e de genética. Os Algoritmos Genéticos são freqüentemente utilizados na solução de problemas dos quais pouco se conhece em relação à função objetivo. Para a coleta de dados de pesquisa foram utilizadas fontes bibliográficas e primárias do caso Inteliway, bem como realizadas entrevistas semi-estruturadas com o autor do projeto, os gestores e os funcionários da área de suporte em TIC de instituições escolares pertencentes a uma rede de ensino com estabelecimentos nos estados do Rio de Janeiro e São Paulo. Preliminarmente, esse trabalho permite concluir que o único e real teste de qualidade de um horário escolar, gerado a partir de uma solução informatizada, é se a instituição o utiliza ou não. É certo que quanto maior o controle sobre o processo de pesquisa e desenvolvimento empregado no horário escolar, e quanto mais amplo o escopo do sistema, tanto maior a probabilidade de ser aceito. Entre as principais características do sistema estudado, destaque-se o entendimento de cada horário escolar por inteiro se constituir em um indivíduo da população a ser analisada e avaliada. Outra boa contribuição diz respeito à formação dos cromossomos não obedecer as regras tradicionais dos Algoritmos Genéticos de representação binária, e sim a uma associação de campos representativos das variáveis, como professor, aluno e turma, impedindo a geração de *Franksteins* quando das mutações. Apesar da solução possuir algumas técnicas e abordagens bem peculiares e de grande simplicidade, associadas à eficácia dos resultados alcançados e facilidade de uso, o sistema possui limitações e acusa a necessidade de otimizações que, comparadas às novas tendências, indicam que não basta a aplicação dos Algoritmos Genéticos, pura e simplesmente, para a consecução dos resultados esperados. A aplicação de uma abordagem mista, como o hibridismo, indica o caminho mais viável para a evolução do aplicativo. Oportuno se faz ressaltar que, em busca por palavra-chave realizada nos anais do Enanpad, não foi encontrado artigo publicado no evento para a solução do problema de geração do horário escolar.

1. Introdução

A grade horária é um objeto que comparece em organizações educacionais de variada natureza e em geral constitui um ente essencial para a realização das suas atividades acadêmicas. A construção de grades horárias escolares consiste em arranjar encontros entre professores, turmas e alunos, em um período de tempo determinado, de modo a atender um conjunto de restrições de diversos tipos. Em muitas situações a construção de uma grade horária escolar constitui um grande desafio. Conforme Souza (2000), no âmbito do estudo da Inteligência Artificial este tipo de problema é reconhecido como sendo um problema de alocação, isto é, como alocar entidades de forma satisfatória obedecendo, na medida do possível, as restrições impostas. No âmbito específico das instituições de ensino o problema é em geral solucionado de forma manual baseado na experiência pessoal adquirida por coordenadores da grade escolar requerendo, na maioria das ocasiões, muito esforço e tempo, podendo chegar a duas semanas de trabalho em uma escola secundária. Nesta situação normalmente busca-se alguma solução que possa ser considerada satisfatória tendo em vista a complexidade do problema e a dificuldade para determinar a solução ótima.

O problema da geração de horários escolares é um exemplo de problema de “*School Timetabling - STP*” e faz parte da classe de problemas de Agendamento de Tarefas (“*Scheduling Problems*”). Segundo Alencar (2001), o agendamento de tarefas é caracterizado como uma tentativa de alocar um conjunto de recursos necessários para a realização de uma gama específica de tarefas tendo como principal objetivo a utilização eficiente e eficaz destes recursos. De maneira genérica, cada um dos recursos deve ser considerado num intervalo de tempo para a consecução de uma única tarefa. A solução de uma grade escolar consiste em associar a cada tarefa, pertencente a um rol determinado, um período de tempo ou horário destinado para a sua realização. A seqüência de efetivação das tarefas é condicionada ao atendimento de uma ou mais metas desejadas. Além da condicionante temporal, existem restrições que precisam ser obedecidas simultaneamente e que condicionam a alocação de recursos específicos tais como equipamentos, laboratórios e insumos em geral. A forma mais usual de definir estas necessidades é por meio da imposição de restrições à ocorrência de cada uma das tarefas do conjunto em relação às demais. Estas restrições devem ser atendidas de forma a possibilitar a ocorrência de cada tarefa, num determinado espaço de tempo.

Num problema de *timetabling* escolar o conteúdo do curso a ser ministrado é normalmente subdividido em um rol de disciplinas. Cada disciplina é ministrada por meio de um conjunto de aulas que acontecem num período de tempo específico, em geral por semana. Disciplinas diferentes podem ter número diferente de aulas, sendo esta uma forte restrição que se impõe à obtenção de um horário válido e aplicável na prática. O período para a distribuição das aulas é geralmente bastante limitado. Além disso, após a montagem da grade escolar é usual que os elementos envolvidos imponham novas restrições ao longo do tempo, por necessidades de professores, alunos ou da própria administração da escola. Ciskon (2006) cita, por exemplo, o problema de geração de horários com foco na eliminação de janelas e aulas isoladas. Assim sendo, uma grade escolar está constantemente sujeita a ajustes e mudanças, guardando uma característica bastante dinâmica e necessitando de respostas rápidas e de consenso entre as partes envolvidas. Dentre as restrições típicas que comparecem numa grade escolar, segundo Souza (2000), destacam-se:

1. grande número de participantes envolvidos, como alunos, professores, turmas, salas de aulas, disciplinas, etc.;
2. indisponibilidade de professores em determinados dias da semana e horários;

3. aulas que demandam a disponibilidade de recursos, como microcomputadores, equipe técnica de apoio, laboratórios, materiais especiais, etc.;
4. política acadêmica de associar determinados docentes a certas turmas ou cursos, ou horários pré-estabelecidos, como por exemplo aulas de educação física alocadas obrigatoriamente no final das jornadas;
5. deslocamento de professores ou alunos para locais fisicamente distantes, num mesmo dia;
6. mais de um período de aula de uma mesma disciplina em um só dia ministradas em seqüência, sem a possibilidade de inserções de outras matérias entre aulas seqüenciais de determinada disciplina.

Entendendo que cada organização escolar possui regras próprias e restrições de diversas ordens, o problema do horário escolar, segundo Alencar (2001), torna-se um desafio de otimização combinatória multidimensional, com elevado número de dimensões e restrições. Como consequência, a determinação de uma solução factível e exequível é, no caso geral, extremamente difícil. O problema de *School Timetabling* é antigo. Existem referências da década de 60, conforme Appleby *et al* (1960), Gotlieb (1962), Cole (1964), Csima (1965), Timmreck (1967), que descrevem propostas de solução inicialmente bastante restritas. Segundo Cooper e Kingston (1995), Souza (2000) e Lobo (2005), mais recentemente, várias propostas de equacionamento do problema surgiram com o uso de técnicas da área de Inteligência Artificial. Trabalhos utilizando as abordagens de *Simulated Annealing*, Pesquisa Tabu, Algoritmos Genéticos e Genéticos Construtivos, Algoritmos Evolucionários e de Heurística Gulosa, Redes Neurais, Grafos, Modelo Matemático e Método Misto, são conhecidos da academia, conforme descritos por Kotsko (2003), Ciscon (2006) e Goes *et al* (2010). Em geral estes trabalhos utilizavam apenas uma abordagem para o tratamento do problema. O desafio atual está em associar as diversas metodologias e abordagens da Inteligência Artificial na busca de uma solução geral e que seja simultaneamente eficaz.

2. Pesquisa e Aspectos Metodológicos

O presente estudo objetiva conhecer, investigar e analisar as vantagens e desvantagens do uso da técnica dos Algoritmos Genéticos em sistemas automatizados na solução do problema de construção da grade ou horário escolar em uma instituição de ensino secundário. Diante da formulação da pergunta-problema de pesquisa, Selltiz *et al* (1974) afirmam que o próximo passo é a definição do seu projeto de pesquisa. Nesta fase foram desenvolvidas as seguintes etapas: 1^a- determinação do tipo de pesquisa; 2^a- escolha do método; 3^a- escolha do caso; 4^a- desenvolvimento do processo de coleta de dados; 5^a- Análise dos resultados.

Segundo a classificação dos autores, as pesquisas podem ser exploratórias, descritivas ou causais. Considerando que a presente pesquisa visa identificar problemas, desenvolver um estudo mais aprofundado sobre eles e formular opções para novos estudos, a pesquisa foi enquadrada como de caráter exploratório. De acordo com Lakatos e Marconi (1982), as pesquisas exploratórias são as investigações de pesquisa empírica, cujo objetivo é a formulação de questões com tripla finalidade: desenvolver hipóteses, aumentar a familiaridade do pesquisador com um ambiente, fato ou fenômeno, ou modificar e clarificar conceitos. Uma vez identificado o tipo de pesquisa, o próximo passo foi a determinação do seu método.

Ainda segundo Triviños (1987), o estudo pode ser classificado como descritivo, pois trata de aprofundar a descrição de uma determinada realidade. Dessa forma, são detalhadas as características básicas do procedimento de busca de soluções com o uso dos Algoritmos

Genéticos, bem como sua aplicação para o caso do *School Timetabling* em instituições pertencentes a uma rede escolar estabelecida nos estados do Rio de Janeiro e de São Paulo.

De maneira sintética, Yin (1989) apresenta as várias formas de se coletar e analisar evidências empíricas, de acordo com as características da pesquisa, que se constituem nas diferentes estratégias exploratórias. São cinco as estratégias citadas pelo autor: experimento, sondagem, análise de arquivo, história e estudo de caso. O método do estudo de caso pareceu o mais aplicável ao estudo, ao atender aos requisitos definidos por Yin (1989), já que se constituiu no exame de um fenômeno contemporâneo, em um contexto da vida real das organizações de ensino, sem limites claros entre eles no qual se utilizam várias fontes de evidências. Dentre as vantagens da aplicação do método do estudo de caso, Selltiz *et al* (1974) destacam que ao se trabalhar em áreas relativamente pouco exploradas, o estudo de exemplos selecionados é muito produtivo para incentivar o entendimento e sugerir hipóteses para pesquisa. A análise de poucos casos pode gerar uma significativa quantidade de novas intuições.

Escolhido o método, buscou-se conhecer as experiências práticas de uso de sistemas automatizados para a geração da grade escolar. Devido à proximidade e facilidade de acesso dos pesquisadores com o autor do projeto, gestores e profissionais de suporte de Tecnologia da Informação e Comunicação - TIC destes sistemas naquela rede de ensino mencionada, oportuno se fez conhecer, investigar e analisar vantagens e desvantagens da solução Inteliway para a geração do horário escolar. Escolhido o sistema, projetado, implantado e em uso nos estabelecimentos escolares, pôs-se a verificar os instrumentos para coleta de dados. Lakatos e Marconi (1982) relacionam os principais: coleta documental, observação, entrevista, questionário, formulário, medidas de opinião, técnicas mercadológicas, testes, sociometria, análise de conteúdo e história de vida.

Atendendo a estes requisitos, foram utilizadas fontes bibliográficas que contemplam o assunto, tais como trabalhos e artigos relacionados ao referencial teórico dos temas *School Timetabling* e Algoritmos Genéticos. Foram utilizadas, ainda, fontes primárias de dados do projeto Inteliway, tais como manuais, relatórios diversos de implantação e operacionalização do sistema, tanto das áreas-fim quanto da área suporte de TIC. Para esclarecimentos sobre o projeto e sistema informatizado foi realizada entrevistas semi-estruturadas, em profundidade, com o autor da solução, bem como com dois gestores e dois funcionários de suporte de TIC das instituições escolares. Cabe salientar que a pesquisa tem como enfoque conhecer a solução Inteliway, suas vantagens e desvantagens sob a ótica da TIC, com o uso dos Algoritmos Genéticos, e não de aspectos como percepção de usuários; custos de desenvolvimento, implantação, operação e manutenção do sistema; usabilidade e aspectos gerais do software; plataforma de hardware empregada, entre outros. O estudo tem suas análises e conclusões limitadas a esta experiência, não sendo admitidas generalizações.

3. Algoritmos Genéticos

Segundo Lobo (2000), um Algoritmo Genético é um procedimento de pesquisa de soluções de problemas inspirado nos princípios de seleção natural e de genética. Algoritmos genéticos são freqüentemente utilizados na solução de problemas dos quais pouco se conhece em relação à função objetivo. Para Ribeiro Filho (2000), o princípio de funcionamento de um algoritmo genético na busca de uma solução ótima é genericamente bastante simples. Ela se inicia com uma população de indivíduos escolhidos aleatoriamente, cada um correspondendo a um candidato particular para a solução do problema. Os melhores indivíduos sobrevivem, cruzam-se e geram novos indivíduos descendentes que irão constituir uma nova geração da população de indivíduos. Esse processo é repetido sistematicamente gerando, em princípio,

populações com candidatos cada vez melhores para a solução ótima. Essa abordagem para problemas de otimização é muito diferente da abordagem clássica. Carvalho (2010) relata que as técnicas de busca e otimização tradicionais baseiam-se em algum algoritmo de busca padrão e que lança mão de heurísticas associadas ao problema para acelerar a localização do ponto ótimo. Em geral não existe um procedimento estruturado para a incorporação destas heurísticas resultando em abordagens demasiado complexas, mesmo com a utilização de computadores. Segundo o autor, apesar de não terem aplicação em universos mais abrangentes, os sistemas tradicionais são amplamente utilizados em inúmeras aplicações.

Os algoritmos genéticos se inspiram na famosa “Teoria Sintética da Evolução” de Charles Darwin. Após anos de pesquisas, Darwin apresentou em 1859 a sua teoria da evolução dos seres vivos do nosso planeta e na qual os indivíduos com maiores chances de sobrevivência seriam os que apresentassem características mais adequadas para adaptação às condições ambientais. Em decorrência dessa melhor adaptabilidade esses indivíduos teriam maior probabilidade de se reproduzirem e perpetuarem a sua descendência. Dessa forma as características favoráveis teriam maiores probabilidades de serem preservadas e as desfavoráveis desapareceriam. Essa teoria foi complementada em 1900 pela redescoberta do trabalho de Gregor Mendel, publicado em 1866, que estabelecia o mecanismo de mutação e de recombinação genética. O conceito de algoritmo genético foi idealizado nos anos 60 por John Holland e desenvolvido em conjunto com seus alunos, em meados dos anos 70. O principal objetivo de Holland (1975) não foi o desenvolvimento de algoritmos para solucionar problemas específicos. O pesquisador se dedicava ao estudo formal do fenômeno da evolução, como ocorre na natureza e segundo a abordagem de Darwin, visando descobrir formas de replicá-lo através do uso de sistemas de computação.

Um algoritmo genético em síntese é um processo de otimização em que os seres se vão adaptando a um ambiente simulado, com a sobrevivência e reprodução dos mais fortes e o desaparecimento e morte dos mais fracos. Dessa forma, segundo Goldberg (1989), os algoritmos genéticos incorporam dois componentes considerados essenciais na evolução das espécies: a sobrevivência do mais forte e a recombinação genética. O autor relaciona alguns aspectos básicos dos algoritmos genéticos que os diferenciam dos métodos tradicionais de otimização:

1. operam com uma codificação do conjunto de parâmetros e não com os próprios parâmetros;
2. operam com uma população e não com um único ponto do espaço solução;
3. utilizam informações de custo e recompensa e não derivadas ou outro conhecimento auxiliar;
4. utilizam regras de transição probabilísticas e não determinísticas.

Atualmente é possível dizer que a teoria da evolução se mostrou uma boa metáfora para a solução de problemas computacionais, já que muitos deles envolvem buscas através de um grande número de possíveis soluções e requerem que os programas sejam adaptativos com capacidade para atuar em ambientes dinâmicos. A evolução biológica é na realidade uma intensa busca paralela em um amplo espaço problema e onde os organismos mais adaptados, comparativamente, representam as soluções computacionais desejadas. Os conceitos básicos envolvidos nessa analogia são:

1. cada indivíduo é interpretado como uma possível solução;
2. mudanças nos indivíduos acontecem por mutação ou reprodução;

3. os indivíduos mais adaptados são selecionados através de sucessivas gerações;
4. a aptidão de cada indivíduo é medida através de uma função de aptidão.

3.1. Funcionamento Simplificado de um Algoritmo Genético

Segundo Goldberg (1989), os algoritmos genéticos empregam uma estratégia de busca paralela e estruturada, com um componente aleatório, e que converge e se reforça em direção aos pontos de “alta aptidão”, isto é, pontos nos quais a função a ser minimizada (ou maximizada) tenha valores relativamente baixos (ou altos). Apesar de aleatória a busca não é constituída de caminhadas direcionadas ao acaso visto que ela explora informações históricas para encontrar novos pontos de busca onde são esperados melhores desempenhos. Tudo isso é feito através de processos iterativos nos quais cada iteração é chamada de geração.

A cada iteração funcionam os princípios de reprodução e de seleção, determinando-se quais indivíduos conseguirão se reproduzir e gerar um número, em geral pré-determinado, de descendentes para a próxima geração. A chance de um indivíduo se reproduzir é determinada pelo seu índice de aptidão de forma que os indivíduos com maior adaptação relativa terão maiores chances de se reproduzir. As características genéticas (genótipo) de cada indivíduo são representadas de forma binária: 1 (um) corresponde à presença de determinada característica e 0 (zero) corresponde a sua ausência. Em geral as características são simplesmente concatenadas formando cadeias de caracteres 0 e 1, por exemplo, 00101 que representa a presença das características de número 3 e 5 e a ausência das características de número 1, 2 e 4.

De acordo com Carvalho (2010), o princípio básico de funcionamento dos algoritmos genéticos se apóia no critério de seleção dos indivíduos sobreviventes a cada geração e que, após sucessivas gerações, deve conseguir gerar uma população de indivíduos cada vez mais aptos. Em princípio a seleção é feita pela escolha dos indivíduos com maiores notas de aptidão, embora não exclusivamente, a fim de manter a diversidade da população. Um método bastante utilizado para a escolha dos indivíduos sobreviventes de uma geração é o método do sorteio da roleta. Neste método cada indivíduo da população é representado na roda da roleta através de uma fatia proporcional ao seu índice de aptidão. Indivíduos com alta aptidão têm uma área maior na roleta, enquanto os com menor aptidão têm uma porção proporcionalmente menor na roleta. A roleta é acionada um determinado número de vezes, dependendo do tamanho da população, sorteando os indivíduos que irão compor a próxima geração.

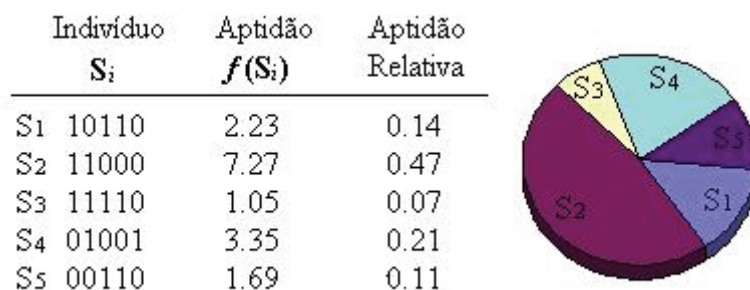


Figura 1 - Indivíduos de uma população e a sua roleta de seleção – (conforme Carvalho, 2010)

3.2. Operadores Genéticos

Conforme Fang (1994), para melhorar a aptidão dos indivíduos através das sucessivas gerações, é necessário lançar mão de operadores, da mesma forma como acontece com os cruzamentos genéticos de populações biológicas. Esses operadores são o cruzamento (*crossover*) e a mutação, e que têm por finalidade assegurar que cada geração seja nova, mas

mantenha características da geração anterior (ou dos pais no caso biológico). Para prevenir o desaparecimento dos melhores indivíduos, causado eventualmente pelo estrito uso dos operadores, pode-se lançar mão de intervenções extraordinárias que forcem a presença de indivíduos na nova geração através da reprodução elitista.

Cruzamento (*crossover*)

De acordo com Nascimento e Mota (2002) o *crossover* procede à recombinação de troca de material genético entre os indivíduos com a transmissão de características para a geração seguinte. O cruzamento constitui a principal forma para a produção de novos indivíduos a serem testados. Ele é o operador responsável pela recombinação de características dos pais durante a reprodução, permitindo que as próximas gerações herdem essas características. O cruzamento acontece com probabilidade dada pela taxa de *crossover* que em princípio deve ser maior que a taxa de mutação. As duas formas principais de troca das características genéticas, representadas através de cadeias, são as seguintes;

1) Um-ponto: um ponto de cruzamento é escolhido na cadeia de cada um dos dois indivíduos (pais) e a partir deste ponto as informações genéticas serão trocadas. As informações anteriores a este ponto em um dos pais são ligadas às informações posteriores a este ponto no outro pai, conforme esquema representado na figura 2. No passo (a) dois indivíduos são escolhidos, no passo (b) um ponto de *crossover* é escolhido (em geral ao acaso) e no passo (c) as características são recombinadas gerando dois novos indivíduos.

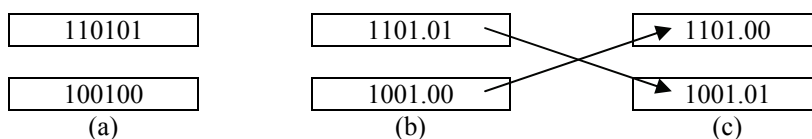


Figura 2 - Exemplo de *crossover* de um ponto (conforme Carvalho, 2010)

2) Multi-pontos: é a generalização do procedimento de troca de material genético envolvendo mais de um ponto de cruzamento.

Mutação

O operador de mutação corresponde à alteração arbitrária de uma ou mais características de um indivíduo, de modo a gerar novos indivíduos com novas características e com o objetivo de manter rica a diversidade genética na população. Em geral considera-se este operador como secundário e utiliza-se uma taxa de mutação pequena. A figura 3 mostra a mutação da característica número 3 de um indivíduo gerando-se um novo indivíduo.

Antes da mutação	1	1	1	0	0
			↓		
Depois da mutação	1	1	0	0	0

Figura 3 - Exemplo de Mutação

Esses operadores são aplicados de forma sistemática a cada nova geração da população. Na figura 4 é delineado o pseudocódigo geral de um algoritmo genético.

```

t := 0 // instante inicial
P := população inicial de indivíduos // gerar população inicial
avaliar aptidão de cada indivíduo de P
enquanto CritérioDeParada (MaxGerações, Aptidão (P)) não é satisfeito faça
    t := t + 1
    P' := seleciona (P) // seleção dos mais aptos
    P'' := reproduz (P') // reprodução dos mais aptos
    P''' := muta (P') // mutação dos mais aptos
    Avaliar aptidão de cada indivíduo de P
    P := substitui ( P, P''' ) // substituir P pela nova população
exibir melhor indivíduo
    
```

Figura 4 - Pseudocódigo de um algoritmo genético

3.3. Parâmetros Genéticos

Carvalho (2010) assinala que os parâmetros genéticos, abaixo descritos, influem no comportamento dos Algoritmos Genéticos e por esse motivo são definidos conforme a necessidade do problema e dos recursos disponíveis.

- a) Tamanho da população – este parâmetro afeta o desempenho global e a eficiência dos algoritmos genéticos. Uma população pequena faz o desempenho cair, pois oferece pequena cobertura ao espaço de busca do problema a cada geração. Uma população grande fornece uma cobertura maior e com melhores chances de convergência para a solução verdadeira do problema. Em contrapartida, esta exige mais recursos computacionais.
- b) Taxa de cruzamento – quanto maior for esta taxa, mais rapidamente novas estruturas serão introduzidas na população. Mas, se esta for muito alta, estruturas com boas aptidões poderão ser retiradas mais rápido do que se desejava. A maior parte da população será substituída, mas com valores muito altos pode ocorrer perda de estruturas de alta aptidão. Com um valor baixo, o algoritmo pode tornar-se muito lento.
- c) Taxa de mutação – deve ser maior que zero para prevenir que uma dada posição fique estagnada em um valor e relativamente baixa para evitar oscilações drásticas nas características da população a cada geração.
- d) Intervalo de geração – define a porcentagem da população que será substituída na próxima geração. Valores altos podem provocar a perda de indivíduos de alta aptidão e muito baixos podem tornar o algoritmo lento.

Um problema clássico que foi abordado, com bons resultados, por meio da utilização dos algoritmos genéticos é o do caixeiro viajante. Basicamente o problema consiste em buscar a melhor rota possível para que um vendedor visite todas as cidades de um conjunto de cidades ao menor custo. Em síntese a abordagem via algoritmos genéticos torna a solução deste problema computacionalmente viável quando comparada com a busca exaustiva da solução dentre todas as combinações de rota possíveis.

Não cabe aqui detalhar esta abordagem, mas apenas a título de curiosidade é delineada a dimensão da busca que a solução por algoritmos genéticos consegue vencer. Supondo que se deseje visitar quatro cidades distintas, então um caixeiro viajante tem seis rotas possíveis diante de si. Isto porque ao sair da primeira cidade ele possui três opções de rotas, ao sair da segunda, duas opções e ao sair da terceira, uma. O número total de rotas é calculado multiplicando $3 \times 2 \times 1 = 6$. Ou seja, para n cidades tem-se $(n-1) \times (n-2) \times \dots \times 2 \times 1 = (n-1)!$

Suponha uma solução computacional tradicional com o uso de equipamento capaz de realizar 1 bilhão de adições por segundo para um caixeiro viajante que necessite percorrer 20 cidades. Suponha também, por simplicidade, que será necessário realizar apenas 19 adições para cada

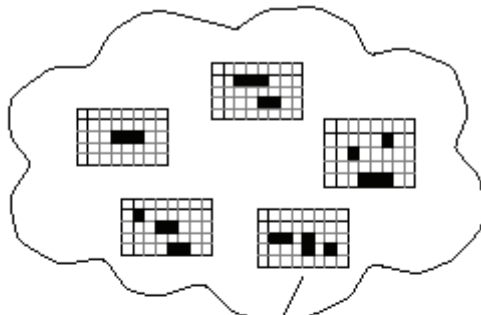
possível rota (no mínimo para calcular o comprimento total dela). Portanto, será possível computar nesse equipamento $10^9 / 19$ rotas por segundo, isto é, 53 milhões de rotas por segundo. Por outro lado, o total de rotas que teriam que ser consideradas é igual a $19!$ O que corresponde a $1,2 \times 10^{17}$. Portanto o tempo de processamento para computar a resposta ótima será de: $1,2 \times 10^{17} / (53 \text{ milhões}) = 2,3 \times 10^9$ segundos e que corresponde a cerca de 73 anos. Claramente o tempo exigido para computar a solução do problema é completamente inviável.

4. Uma Aplicação de Algoritmos Genéticos ao Problema de *School Timetabling*

Burke *et al* (1994) descrevem a aplicação de algoritmos genéticos na programação de exames universitários onde se procura otimizar o uso de locais e os horários. Nesta aplicação o algoritmo genético inicia o processo de solução gerando aleatoriamente um conjunto (população) de tabelas de horários e que são avaliados de acordo com algum critério, por exemplo, o nº de vezes que algum estudante tem que comparecer a dois exames seguidos.

Segundo esse critério selecionam-se membros da população (tabelas de horários) como pais para a próxima geração de tabelas de horários. Como a avaliação é dirigida para a escolha das melhores tabelas, as piores acabam excluídas e a pesquisa caminha em direção às áreas mais promissoras do espaço de busca. Esse esquema está representado na figura 5.

Initialisation



Um algoritmo gera aleatoriamente uma população de tabelas viáveis.

Evaluation

$$f \left(\begin{array}{|c|c|c|c|c|} \hline & & & & \\ \hline & & & & \\ \hline & & & & \\ \hline & & & & \\ \hline & & & & \\ \hline \end{array} \right) = x$$

Cada tabela é analisada de acordo com os critérios estabelecidos (por exemplo: a extensão da tabela, quantos alunos têm que prestar exames seguidos, ou quantos assentos vagos há)

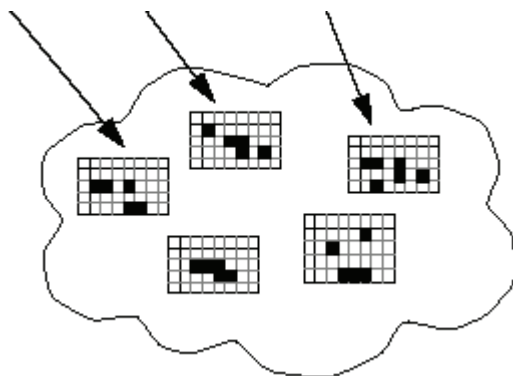
Selection

Tabelas são selecionadas aleatoriamente para constituir a base da nova geração. As tabelas “boas” terão maior probabilidade do que as “ruins” de serem as escolhidas.

Operators



O operador de mutação altera aleatoriamente o horário e a sala do exame, sempre mantendo a tabela viável.



O operador de cruzamento (*crossover*) seleciona a primeira data de exame de uma tabela e a última data da outra tabela, gerando uma nova tabela. Horários de exames que não possam ser alterados desta forma, serão fixados para o primeiro horário possível.

É gerada uma nova população. O processo se repete até encontrar uma solução “boa”.

Figura 5 - Esquema do algoritmo genético aplicado a tabelas de horários de exames (conforme Burke *et al*, 1994)

4.1. A Geração da Tabela de Horários

Segundo Burke *et al* (1994), duas restrições governam a produção de uma tabela de horários: nenhum estudante e nenhum fiscal podem estar ao mesmo tempo em mais do que um local, e tem que haver assentos suficientes para todos os estudantes presentes. A tabela que atende a esses requisitos eles chamam de tabela viável. Entretanto, o simples fato de uma tabela ser viável não significa que ela seja boa para uso. Existem muitos outros critérios para julgar a qualidade de uma tabela. O mais recorrente desses critérios é o de que se deveria evitar que um aluno tivesse que comparecer a dois exames em horários imediatamente seguidos. Havendo exames com tempos diferentes de duração pode ser necessário marcar primeiro os exames mais longos, para permitir maiores possibilidades de horários para esses exames. Mas, além de tudo, ponderam os autores, uma tabela de horários só será considerada realmente boa se a instituição usá-la efetivamente.

No enfoque utilizado pelos autores também acaba incorporado conhecimento específico do caso em estudo para garantir que nenhuma tabela inviável seja considerada candidata. Também se aconselha a não fixar o número de períodos (dias) para a tabela pois isso poderá gerar exames em horários conflitantes, dessa forma, a extensão da tabela em períodos é deixada livre para variar conforme a necessidade.

Os autores ponderam que uma tabela de horários que ultrapassa um número limite de períodos pode ser considerada indesejável, mas que uma tabela “ótima” que obedeça a essa limitação talvez não exista. O planejador da tabela poderá incluir pesos na função de avaliação da tabela, dando um peso maior para menos períodos e peso menor para maior quantidade de períodos. Também existe a possibilidade de se introduzirem funções com a finalidade de atender as necessidades específicas de determinadas entidades. Porém, os autores alertam para o risco de se introduzirem critérios que, apesar de desejáveis, não são estritamente necessários e assim facilitar a geração de tabelas inviáveis como solução.

4.2. Resultados do Algoritmo Genético

Burke *et al* (1994) apresentam exemplos de utilização do algoritmo genético na elaboração de tabelas de horários em alguns testes de solução de problemas. Um desses testes envolveu 100 exames a serem distribuídos por quatro salas com capacidades de 40, 80, 160 e 160 lugares. Para cada tabela foi gerada uma matriz de conflitos. Se o valor de uma determinada linha versus coluna for 1 (um), então existe um aluno com horário conflitante, caso contrário o valor será 0 (zero). A probabilidade de quaisquer dois exames terem horários conflitantes é dada por p e no exemplo citado foi de 0,2 0,4 e 0,5 e o tamanho de cada exame, gerado aleatoriamente assumiu valores entre 1 e 100. A função de avaliação utilizada foi a seguinte:

$$\begin{aligned}
 & [(\text{TAMANHO DA TABELA EM PERÍODOS}) - 10]^2 \times 50 \\
 & + (\text{NUMERO DE EXAMES ADJACENTES CONFLITANTES}) \times ADJ \\
 & + [\sum_{\text{períodos}} \sum_{\text{salas utilizadas}} (\text{LUGARES DISPONÍVEIS})^2] / 1000
 \end{aligned}$$

onde *ADJ* (peso para penalizar exames a serem feitos em períodos adjacentes conflitantes, situação chamada de “conflito de segunda ordem”) é uma constante e Lugares Disponíveis são contados somente se existir pelo menos um exame marcado para a sala. Nos testes efetuados os autores variaram o valor de *ADJ* para verificar sua influência no tamanho da tabela gerada concluindo que, se for dado um valor alto a *ADJ*, isto é, exames adjacentes são considerados uma situação muito ruim, então a tabela resultante será muito longa. Se for desejada uma tabela mais curta então *ADJ* deve ser fixado em um valor mais baixo.

Na tabela da figura 6 são apresentados os resultados para valores de *p* entre 0,2 e 0,5 e valores de *ADJ* entre 1 e 100. Os valores que aparecem nas células representam “número de exames adjacentes/tamanho da tabela (medida em períodos)” dos melhores resultados gerados por 10 ciclos de 300 gerações, cada uma com uma população de 100 tabelas. A informação sublinhada é a melhor tabela gerada a partir da população inicial.

	<i>ADJ</i> =1	<i>ADJ</i> =20	<i>ADJ</i> =50	<i>ADJ</i> =100
<i>p</i> =0,2	<u>177/13</u> 162/13	<u>162/14</u> 119/14 101/15	<u>159/14</u> 106/14 102/15 101/16	<u>143/14</u> 110/15 89/16
<i>p</i> =0,4	<u>295/13</u> 288/13	<u>273/17</u> 217/17 188/18	<u>243/18</u> 188/18 173/19 159/20	<u>218/20</u> 179/18 171/19 163/20 143/21
<i>p</i> =0,5	<u>268/19</u> 164/18 251/19	<u>247/20</u> 219/20 204/21	<u>246/20</u> 167/24 155/26 141/28	<u>235/23</u> 147/26 137/28 126/32

Exemplo:

<u>247/20</u>	←
219/20	
204/21	←

Melhor valor na população inicial.

Tabelas geradas pelo algoritmo.
Exames marcados em 21 períodos com 204 conflitos de segunda ordem.

Figura 6 - Resultados do algoritmo genético (conforme Burke *et al*, 1994)

5. O Caso Inteliway

Barros (2002) relata que nos anos 80 uma grande empresa que desenvolvia software para o mercado brasileiro recebeu uma solicitação de uma instituição acadêmica de ensino médio para que, baseado em uma série de condições e disponibilidades, fosse montado de maneira sistêmica um horário escolar entendido como ideal. O programador indicado para o trabalho, lançando mão apenas de metodologias tradicionais de programação, levou cerca de três meses tentando desenvolver a solução.

Com o insucesso das tentativas realizadas e o fim do prazo para a entrega do trabalho, o programador concluiu que não havia outra solução a não ser lançar mão da solução manual.

Assim, teve que estender numa sala um rol enorme de papéis contendo os dados de montagem do horário e, baseado nos métodos de tentativa e erro, de evoluções sucessivas, e de priorização de restrições, conseguiu apresentar seu produto final sem o correspondente e esperado algoritmo. Diante deste fato, posteriormente, o autor se propôs a buscar uma solução informatizada com o uso de algoritmos genéticos e com apoio em alguns trabalhos científicos. Dentre estes, destaque-se a classificação em seis classes dos tipos mais comuns de restrições em problemas de *timetabling*, elaborado por Alkan e Özcan (2003), conforme Quadro 1:

Quadro 1 – Restrições em Problemas de *School Timetabling*

Restrição	Significado	Exemplo
Exclusão	Membros excluídos de recursos para variáveis	Matemática não pode na 6ª feira
Predefinição	Atribuições predeterminadas para certa variável	Artes não pode na 2ª feira, das 14h as 17h
Aresta	Par de aulas deve acontecer sem colisão de horário	Aula dupla de Português, sendo a 2ª de uma turma no mesmo horário da 1ª de outra turma
Ordenamento	Necessidade de aulas em determinada seqüência	Matemática antes de Ed. Física
Espalhamento	Distribuição uniforme das aulas na semana	Todas as aulas de Biologia na 2ª feira e mais nenhuma na semana
Atributo	Especificações de uma aula ou recursos que necessita	Nº máximo de alunos/turma e capacidade da sala de aula

Já as questões clássicas que permeiam abordagens via algoritmos genéticos tiveram que ser consideradas no âmbito do problema de *School Timetabling*. Estas questões são:

1. Como representar os indivíduos?
2. Quem é a população inicial?
3. Como definir a função objetivo?
4. Quais são os critérios de seleção?
5. Como definir e aplicar o operador de reprodução?
6. Como definir e aplicar o operador de mutação?
7. Como garantir a convergência para a solução ótima?

Após pesquisa de campo em algumas unidades escolares acabou estabelecida uma série de funcionalidades consideradas básicas para o sistema automatizado. Entre as principais estão:

1. flexibilidade na definição dos períodos escolares;
2. programa de disciplinas e carga horária determinados por turmas;
3. liberdade na determinação da disponibilidade dos professores;
4. possibilidade de pré-determinação de professores por turma;
5. visualização do horário gerado, por turma e por professor;
6. possibilidade de ajustes pontuais no horário escolar;
7. geração automática da grade escolar e outros relatórios;
8. interface do sistema necessitando inserção de dados;
9. uso de cores indicativas do grau do atendimento ou não das restrições.

Para que não houvesse um significativo desperdício de tempo na geração dos horários escolares, e como forma de garantir a convergência dos resultados, foi criado um grupo de regras fixas para o sistema. Estas regras básicas servem como verdadeiras cláusulas péticas do sistema, devido a sua constância em todas as demandas de interessados na solução. Caso alguma delas não fosse obedecida, então novo código deveria ser criado, customizado especificamente para determinado cliente. As regras são as seguintes:

1. definição da quantidade de aulas por disciplina e por semana;
2. disciplinas ministradas por professor;

3. disciplinas determinadas por período: manhã, tarde, noite;
4. definição do limite de disciplinas por período;
5. definição prévia das disciplinas por curso.

A função objetivo definida por Barros (2002) abrigava sete critérios gerais, indicativos do grau de tolerância ou não ao atendimento das restrições, bem como o grau de prioridade dado pelo usuário. Para o atendimento à regra de restrição, o cliente deve lançar apenas a opção Sim ou Não. Para a determinação do grau de prioridade, fica a critério do cliente determinar um peso, fornecido por uma escala de zero a nove. Quanto maior o grau de prioridade de uma regra, maior o peso lançado pelo usuário do sistema. A seguir, são relacionados os sete critérios de tolerância aos conflitos definidos pelo autor, após várias simulações:

1. janela por turma, significando a possibilidade ou não de uma turma ficar ou não um período sem aula entre outros com aulas;
2. janela na disciplina, significando a possibilidade ou não de uma turma ter duas ou mais aulas de determinada disciplina intercaladas por outra disciplina;
3. limite de aulas por disciplina por dia;
4. janela de professor, significando a possibilidade ou não de um professor ficar um período ocioso entre aulas;
5. horário de preferência do professor;
6. impedimento no horário do professor;
7. professor fora dos limites diários, significando a possibilidade ou não do professor ministrar aulas fora dos limites estabelecidos por ele.

A partir de alguns trabalhos científicos sobre a utilização dos algoritmos genéticos em gerenciais, dentre eles destaque-se o de Fang (1994), acabou estabelecido um universo inicial de 100 elementos para a aplicação da metodologia. Assim, foram gerados aleatoriamente, sem qualquer preocupação quanto ao atendimento dos critérios da função objetivo, mas atendendo às cinco regras básicas definidas, 100 horários escolares como ponto de partida.

Em seguida, os 100 horários escolares foram analisados segundo os critérios da função objetivo, avaliados com a atribuição de notas segundo o atendimento às restrições e ao grau de prioridade, e relacionados segundo um ranking decrescente de notas. Se atendido o critério de parada, estabelecido pelo grau máximo que a função objetivo possa atingir, o programa acusa o horário escolar entendido como o mais próximo do ideal. Caso contrário, o sistema seleciona a população dos 10 horários mais aptos, gera por reprodução outros 80 e, a partir dos 10 mais aptos, gera por mutação outros 10, voltando a ter um novo universo de 100 indivíduos. O processo de avaliação de aptidão é aplicado à nova amostra, e conforme for, são selecionados 10 sobreviventes para outra seleção, reprodução e mutação, até que o sistema indique que o critério de parada foi atendido.

Se, no entanto, o sistema demandar um tempo considerado excessivo para o desenvolvimento deste processo, ajustes são feitos nos pesos dos critérios de restrição, como o ajuste fino do som de um rádio, na busca da recepção mais nítida do som. Em outro caso, se o sistema acusar um horário que porventura tenha atendido a todos os requisitos do usuário e ainda assim, numa análise preliminar, ele não seja considerado como um produto definitivo, novamente o cliente pode intervir no sistema e alterar os pesos inicialmente lançados. Em síntese, segue o pseudocódigo do caso Inteliway:

t := 0	// instante inicial
P := 100 horários	// gerar horários aleatoriamente
avaliar aptidão dos horários e classificar	// avaliação através da função objetivo
enquanto o critério de parada não é satisfeito faça	
t := t + 1	
P' := seleciona (P)	// escolhe 10 indivíduos mais aptos
P'' := reproduz (P')	// gera 80 indivíduos por reprodução
P''' := muta (P')	// gera 10 indivíduos por mutação
P := P' + P'' + P'''	// substitui população
avaliar aptidão dos horários e classificar	// avaliação através da função objetivo
exibir o melhor horário	

Figura 7 – Pseudocódigo (Barros, 2002)

A fim de que nos processos de reprodução e mutação não sejam gerados os chamados *Franksteins*, ou seja, cromossomos formados por campos truncados, com dados imperfeitos ou inexistentes, a associação de entidades em um cromossomo se dá pela associação dos campos, diferentemente da solução tradicional da sua representação por meio de seqüências binárias. Assim, numa reprodução, são trocados os dois professores inicialmente alocados em duas turmas, de tal forma que o professor A faça parte do cromossomo onde estava anteriormente o professor B e vice-versa. Numa mutação, são retirados aleatoriamente alguns professores de determinadas disciplinas e recolocados também, aleatoriamente, nos cromossomos com disponibilidade de professor, a fim de que novos horários sejam gerados sem que se corra o perigo da criação de professores, disciplinas ou turmas inexistentes.

Por fim, como relatórios finais, o horário escolar pode ser visualizado por número da turma, por curso ou por professor, garantindo a estas três entidades o acesso rápido à informação gerada o mais próxima possível da conformidade estabelecida no início do processo. Tendo alcançado na prática bons resultados no uso do aplicativo em algumas instituições escolares dos estados de São Paulo e do Rio de Janeiro, a solução Intelipay vem sofrendo ao longo do tempo uma série de ajustes de natureza técnica ou por solicitações de usuários com alto grau de complexidade.

Quanto à metodologia, simulações no código fonte foram efetuadas de maneira empírica, a fim de que o aplicativo ganhasse em *performance* e na qualidade da solução final. Foram realizadas tentativas no sentido de reduzir para 80 ou aumentar para 120 ou 150 o número de indivíduos da população inicial e das novas gerações. A prática confirmou a teoria ao se verificar em 100 o número ideal para a população a ser avaliada. Da mesma forma, foram estabelecidas novas formas de mutação e reprodução, aumento do número de indivíduos selecionados para 15, bem como alterações na escala de pesos de 0 a 5, estabelecimento de novos critérios, retirada de uma ou duas regras básicas e estabelecimento de outras, entre algumas das simulações efetuadas.

Quanto à necessidade do usuário, novas funcionalidades a partir das especificidades de cada instituição vêm sendo agregadas, de tal sorte que a cada ano uma versão mais atualizada do sistema é colocada em produção, com um número menor de intervenções por parte dos usuários e uma maior complexidade na manutenção do código fonte. O autor considera entre as limitações atuais do sistema objeto de estudo:

- 1- a necessidade de buscar cada vez mais *performance* e rapidez na obtenção do melhor horário escolar possível;
- 2- a possibilidade de customização imediata para usuários de diversas classes de instituições e organizações escolares;
- 3- a disponibilidade do aplicativo na Internet;

- 4- a criação de novos e detalhados relatórios administrativo-gerenciais;
- 5- a criação de uma versão para rede, com a participação compartilhada de mais de um participante no sistema;
- 6- a migração do sistema informatizado para softwares gerenciadores de banco de dados e de desenvolvimento de aplicativos mais modernos;
- 7- a possibilidade de criação de novas regras básicas ou critérios de restrição pelos próprios usuários, com a mínima intervenção do programador ou sem qualquer intervenção.

6- Conclusão e Considerações Finais

Após a identificação de que o problema do *School Timetabling* é de fácil entendimento, porém de alta complexidade, na busca de soluções informatizadas, o presente trabalho relatou o seu enquadramento na classe dos problemas de agendamento de tarefas e na montagem de um horário escolar em detalhes. Na Introdução foi realizada uma sintética revisão das propostas de solução do problema, desde o ano de 1960 até as abordagens mais recentes, com a utilização de meta-heurísticas e soluções combinadas da área de Inteligência Artificial. Em seguida, foi descrita a metodologia aplicada, sendo basicamente uma pesquisa exploratória, qualitativa, com o uso do método do estado de caso Inteliway. No item 3, foi ministrada a explicação sintética do que são os Algoritmos Genéticos, principais operadores genéticos como a reprodução e a mutação (*crossover*), parâmetros genéticos e funcionamento de sua metodologia de aplicação.

No item 4, foram relatados os conceitos de uma aplicação dos Algoritmos Genéticos para o desenvolvimento de um horário escolar, a geração de uma tabela de horários e alguns dos resultados obtidos. No item 5, foi descrito o estudo do caso e da solução Inteliway para o problema, considerando o seu uso em instituições escolares dos estados do Rio de Janeiro e São Paulo, suas regras básicas, principais funcionalidades, pseudocódigo, restrições e prioridades da função objetivo, otimizações e limitações. Preliminarmente, esse trabalho permitiu concluir que o único e real teste de qualidade de um horário escolar, gerado a partir de uma solução informatizada, é se a instituição o utiliza ou não. É certo que quanto maior o controle sobre o processo de pesquisa e desenvolvimento empregado no horário escolar, e quanto mais amplo o escopo do sistema, tanto maior a probabilidade de ser aceito.

Um fato que causou surpresa aos pesquisadores relaciona-se ao grande número de relatos, artigos e abordagens científicas propondo soluções para o problema do *School Timetabling*, sem que se tenha chegado a uma conclusão definitiva ou bem próxima de um consenso geral, sobre um problema tão corriqueiro e antigo. Desde os métodos tradicionais de geração de aplicativos até àqueles classificados como de Inteligência Artificial, uma significativa evolução foi constatada, porém com uma substancial diversidade de enfoques e propostas de solução.

A própria comunidade científica, que consagrou a abordagem dos Algoritmos Genéticos como uma boa solução para o problema do *School Timetabling*, vem indicando a associação de técnicas e abordagens da Inteligência Artificial como uma tendência de evolução na busca de soluções mais próximas da ideal. Mais uma vez a natureza inspira as soluções de Tecnologia da Informação. O comensalismo e o mutualismo entre indivíduos da mesma ou de diferentes espécies, cria a associação destes e permite ao primeiro participante ceder ao segundo suas capacidades potenciais para completar deficiências existentes, e vice-versa. Na área de TI, seria uma espécie de aproveitamento do melhor de cada técnica como forma de suplantar a deficiência existente em outra, obtendo-se soluções híbridas de melhor qualidade que aquelas obtidas com a aplicação exclusiva de uma determinada abordagem.

Alencar (2001) relata que é na busca de características como a flexibilidade, adaptabilidade às restrições, e na abrangência das soluções inspiradas pelo hibridismo das abordagens da Inteligência Artificial que surgirão soluções mais eficientes e eficazes. Autores como Elmohamed *et al* (1997) relatam a criação de uma solução híbrida, onde se pode inclusive incluir a complexa função de custo ao problema. Para Schaerf e Moscato (1999) e Werra (1995) os problemas de geração de grades escolares não podem ser completamente automatizados, por duas razões: a primeira, por existirem razões que fazem um horário melhor que outro e que não podem ser facilmente explicitados em um sistema automático; a segunda, considerando que uma intervenção humana pode desviar a busca em direções mais promissoras que o sistema poderia não ser capaz de achar sozinho, devido ao vasto espaço de busca a considerar.

No que se refere ao estudo do caso Inteliway, alguns avanços consideráveis foram obtidos, principalmente pelo uso em universidades, escolas de ensino médio, e escolas profissionalizantes, conforme relatado no item 6. Entre as principais características do sistema, destaque-se o entendimento de cada horário escolar por inteiro se constituir em um indivíduo da população a ser analisada e avaliada. Outra boa contribuição diz respeito à formação dos cromossomos não obedecer as regras tradicionais dos Algoritmos Genéticos de representação binária, e sim a uma associação de campos representativos das variáveis, como professor, aluno e turma, impedindo a geração de *Franksteins* quando das mutações.

Apesar da solução possuir algumas técnicas e abordagens bem peculiares e de grande simplicidade, associadas à eficácia dos resultados alcançados e facilidade de uso, o sistema possui limitações e acusa a necessidade de otimizações que, comparadas às novas tendências, indicam que não basta a aplicação dos Algoritmos Genéticos, pura e simplesmente, para a consecução dos resultados esperados. A aplicação de uma abordagem mista, como o hibridismo, indica o caminho mais viável para a evolução do aplicativo. De qualquer forma, o presente trabalho não tem a pretensão de esgotar o assunto. O problema do *School Timetabling*, como sua própria história sugere supor, devido às características peculiares de cada instituição escolar, ainda está aberto a novas abordagens, ou a conjugação de outras, sem que se possa vislumbrar uma solução universal ou unânime que atenda a todos os casos.

7- Referências Bibliográficas

- ALCAN, A., ÖZCAN, E. *Memetic Algorithms for Timetabling*. In: 2003 IEEE Congress on Evolutionary Computation, Canberra, Australia, *Proceedings*, dez.2003, p. 1796-1802.
- ALENCAR, W. de S. *Sistema automático de elaboração de horários de aulas combinando programação lógica com restrições hierárquicas*. Goiânia: 2001. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) – Universidade Federal de Goiás, Goiás.
- APPLEBY, J.S., BLACK, D.V., NEWMAN, E.A. Techniques for producing school timetables on a computer and their application to other scheduling problems. *The Computer Journal*, n. 3, p. 237-245, 1960.
- BARROS, C.P. *Horário Escolar Inteligente*. São Paulo, documentos internos, 2002.
- BURKE, E.K., ELLIMAN, D.G., WEARE, R.F. *A Genetic Algorithm based University Timetabling System*. In: East-West International Conference on Computer Technologies in Education, 2., 1994, Crimea, Ukraine. *Proceedings*, v. 1, set. 1994, p. 35-40.
- CARVALHO, A.P. de L.F. *Algoritmos Genéticos* – Documento Tutorial, disponível em <www.icmc.sc.usp.br/~andre/genetic>. Acesso em 7 jun. 2010.

- CISCON, L.A. *O problema de geração de horários: um foco na eliminação de janelas e aulas isoladas*. Lavras: 2006. Monografia (Graduação em Ciência da Computação) – Universidade Federal de Lavras, Lavras.
- COLE, A.J. The preparation of examination timetables using a small-store computer. *The Computer Journal*, n. 7, p.117-121, 1964.
- COOPER, T.B., KINGSTON, J.H. *The complexity of timetable construction problems*. In. 1st Conference on the Practice and Theory of Automated Timetabling, PATAT, 1995. *Proceedings*, Ed. E. Burke and P. Ross, Springer-Verlag, 1995, p. 283-295.
- CSIMA, J. *Investigations on a time-table problem*. Toronto: 1965 (Ph.D. thesis). School of Graduate Studies, University of Toronto, Toronto.
- ELMOHAMED, S.; CODDINGTON, P. , FOX, G.C. *A comparison of annealing techniques for academic course scheduling*. In: 2. Conference on the Practice and Theory of Automated Timetabling, PATAT 1997. *Proceedings*. Ed. E.Burke and P.Ross, Spring, 1997, p. 146-166.
- FANG, H. *Genetic Algorithms in Timetabling and Scheduling*. Edinburg: 1994. (Ph.D. thesis). Department of Artificial Intelligence, University of Edinburg, Edinburg.
- GOES, A.R.T., COSTA, D.M.B., STEINER, M.T.A. Otimização na programação de horários de professores/turmas: modelo matemático, abordagem heurística e método misto. *Revista Eletrônica Sistemas & Gestão*, v. 5, n. 1, p. 50-66, jan.-abr. 2010.
- GOLDBERG, D.E. *Genetic Algorithms in search, optimizations and machine learning*. Addison-Wesley, New York, 1989.
- GOTLIEB, C. *The construction of class-teacher timetables*. In: IFIP Con, *Proceedings*, 1962.
- HOLLAND, J.H. *Adaptation in Natural and Artificial System*. Univ. of Michigan Press, 1975.
- KOTSKO, E.G.S. *Otimização na construção da grade horária escolar: uma aplicação*. Curitiba: 2003. Dissertação (Mestrado em Métodos Numéricos em Engenharia) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- LAKATOS, E.M., MARCONI, M. de A. *Metodologia Científica*. São Paulo: Atlas, 1982.
- LOBO, E.L.M. *Uma solução do problema de horário escolar via Algoritmo Genético paralelo*. Belo Horizonte: 2005. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática e Computacional) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- LOBO, F.G. *The parameter-less genetic algorithm: rational and automated parameter selection for simplified genetic algorithm operation*. Lisboa: 2000. (PhD dissertation) - Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova, Lisboa.
- NASCIMENTO, J.A., MOTA, W.S. *Projeto de Estabilizadores de Sistemas de Potência por Controle Clássico e Algoritmos Genéticos*. In. Congresso Brasileiro de Automática, 2002, Natal. *Anais*. set. 2002.
- RIBEIRO FILHO, G. *Melhoramentos do Algoritmo Genético Construtivo e Novas Aplicações em Problemas de Agrupamento*. S. José dos Campos: 2000. Tese (Doutorado em Computação Aplicada) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, S. José dos Campos.
- SCHAERF, A., MOSCATO, P. *Local search techniques for scheduling and timetabling problems*. In. SOBRAPO, 30., 1999, Curitiba. *Anais*, Curitiba: Sobrapo, nov. 1998.
- SELLTIZ, C. *et al. Métodos de pesquisas nas relações sociais*. 8. reimp. São Paulo: EPU, 1974.
- SOUZA, M.J.F. *Programação de horários em escolas: uma aproximação por meta-heurísticas*. Rio de Janeiro: 2000. Tese (Doutorado em Engenharia de Sistemas e Computação) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- TIMMRECK, E.M. Scheduler: A program that uses instructor and student preferences to form timetables. *Computer Science Technical Report*, n. 3, University of Wisconsin, 1967.
- TRIVIÑOS, A.N.S. *Introdução à Pesquisa em Ciências Sociais*. São Paulo: Atlas, 1987.
- WERRA, D. de. An introduction to timetabling. *European Journal of Operational Research Society*, v. 19, 1985, p. 151-162.
- YIN, R.K. *Case study research: design and methods*. 2.ed. California:Sage Publications, 1994.