

# SIMULATED ANNEALING E SISTEMA MULTIAGENTE NA ABORDAGEM DE TIMETABLING APLICADA AO ESCALONAMENTO DE VEÍCULOS DE TRANSPORTE PÚBLICO

Gilberto Giordano Filho  
[giordanofilho@gmail.com](mailto:giordanofilho@gmail.com)

Vinicius Gadis Ribeiro  
Centro Universitário Ritter dos Reis – UNIRITTER/Brazil  
Escola Superior de Propaganda e Marketing – ESPM/Brazil  
[vinicius@uniritter.edu.br](mailto:vinicius@uniritter.edu.br)

**Abstract:** This work presents a comparison between a study on a hybrid solution composed of multi-agents system and GRASP techniques and other solution using Simulated Annealing applied to the timetabling problem. Specifically, we study the efficiency of these methods in dealing with the problem of scheduling vehicles in urban public transport, with the aim of estimating the appropriate number for a given set of bus lines. This work was developed in cooperation with AGERGS (State Agency for Regulation of Public Services of Rio Grande do Sul), in the estimation of variable Fleet Effective, it has important implications for the determination of efficient cost and return on capital in the processes of the tariff revision of the transport sector.

**Keywords:** Simulation; Programming; Public transport project; Restrictions; Optimization.

**Resumo:** Este trabalho apresenta uma análise comparativa entre um estudo de uma solução híbrida composta de um Sistema Multiagente e a meta-heurística GRASP e outra solução utilizando a heurística *Simulated Annealing*, ambas aplicadas a um problema de *timetabling*. Especificamente, estudamos a eficiência destes métodos para lidar com o problema de escalonamento de veículos de transporte público urbano, com o objetivo de estimar o número adequado de ônibus para um determinado conjunto de linhas. Este trabalho foi desenvolvido em cooperação com a AGERGS (Agência Estadual de Regulação de Serviços Públicos do Rio Grande do Sul), na estimativa da variável Frota efetiva, a qual tem implicações importantes como, por exemplo, no custo eficiente e retorno sobre o capital nos processos da revisão tarifária do setor de transporte.

**Palavras-chave:** Timetabling; Simulação; Projeto para programação de transporte público; Restrições; otimização.

## I. INTRODUÇÃO

Um problema de *timetabling* pode ser considerado como de busca, porém na grande maioria dos casos é abordado como de otimização, no qual se busca atender todas as restrições necessárias (*hard constraints*) e maximizar o atendimento das restrições desejáveis (*soft constraints*) [1].

Esse tipo de problema é considerado relevante principalmente na área de pesquisa operacional, mostrando-se de alto grau de complexidade e exigindo métodos computacionais diferenciados para seu tratamento [1]. A partir do ponto que as tecnologias convencionais não demonstram eficiência na abordagem desse tipo de problema, torna-se importante o estudo e aperfeiçoamento dos métodos computacionais mais adequados, dentre os quais se destacam: algoritmos genéticos [1], tabu search [2], GRASP [3], sistema multiagente [4], redes neurais [5] e soluções híbridas [6].

Diferente do que acontece em problemas de busca, uma boa solução para este tipo de problema não é exatamente aquela que atende todas as restrições impostas, mas sim, aquela que entre todas as soluções aceitáveis apresenta o menor, ou maior valor para a função objetivo, dependendo se é um problema de minimização ou de maximização, respectivamente [1].

A questão abordada neste estudo é um caso específico de *timetabling*, onde o objetivo principal é definir um número mínimo de ônibus que consigam atender todos os horários de um determinado conjunto de linhas. Esse número de ônibus utilizados pelas empresas para atender os passageiros de um município é chamado de variável “Frota Efetiva”.

A variável Frota Efetiva é importante para a determinação da Remuneração do Capital, abordada na Nota Técnica DT n° 05/2007 [7]; determinação do

valor da depreciação da frota, abordada na Nota Técnica DT nº 06/2007 [8] e para a determinação do valor do custo de pessoal, abordada na Nota Técnica DT nº 08/2007 [9].

Assim, essa variável possui considerável relevância, o que justifica a abordagem e o trabalho investigativo. Deve-se ressaltar ainda que o seu aperfeiçoamento visa alcançar o número de veículos utilizados pelas empresas, sendo sempre o mais próximo possível da realidade de operação do conjunto de linhas e horários a serem atendidos, visto que essa variável contribui na definição da tarifa do transporte a ser cobrada do usuário.

Portanto, além da grande relevância em testar métodos computacionalmente eficazes na abordagem de problemas de *timetabling*, também é de grande valia buscar formas de otimização da variável Frota Efetiva, tanto para empresas quanto para os cidadãos.

O presente trabalho está estruturado da seguinte forma: a seção II apresenta, de modo geral, os métodos de abordagem desse problema. As seções III e IV detalham as abordagens escolhidas para implementação desenvolvida. A coleta e a análise dos dados, assim como a avaliação, são apresentadas na seção V. Os resultados obtidos são discutidos na seção VI, sendo apresentadas posteriormente as conclusões do presente trabalho.

## II. MÉTODOS DE ABORDAGEM

Devido ao alto grau de complexidade apresentados pelos problemas classificados como de *timetabling*, surge a necessidade de abordagens, na maioria dos casos, através de métodos diferenciados como meta-heurísticas. Devido à dificuldade de abordagem, normalmente não é possível nem mesmo provar que a solução encontrada é a melhor existente.

Através da pesquisa sobre as características específicas de cada uma das técnicas computacionais utilizadas para a resolução de problemas da classe de *timetabling*, foi possível propor a utilização de um sistema multiagente (SMA) aliado a uma meta-heurística de melhoramento chamada *Greedy Randomized Adaptive Search Procedure (GRASP)* para abordagem do caso atual. Entretanto, para fins de comparação e análise, escolhemos outra técnica chamada *simulated annealing* para abordar o mesmo problema e gerar dados comparativos sobre a especificação do número de veículos necessários para um determinado conjunto de linhas de ônibus.

## III. PRIMEIRA ABORDAGEM PROPOSTA UTILIZANDO UM MODELO HÍBRIDO

A primeira proposta de solução utilização de um modelo híbrido composto pela meta-heurística GRASP e um SMA, une dois métodos com o objetivo de abordar o estudo de caso representando suas características reais, e ao mesmo tempo, agregar qualidade para o tratamento da alta complexidade natural apresentada pelo problema. A Figura 1 representa, para fins de entendimento, uma visão geral da arquitetura do modelo proposto, evidenciando um SMA que atua sobre um conjunto de dados. Podem-se observar também três elementos: um conjunto de agentes do tipo **Ônibus**, um agente **GRASP** que implementa as características da meta-heurística e um módulo **Gerenciador** para controlar o acesso aos dados.

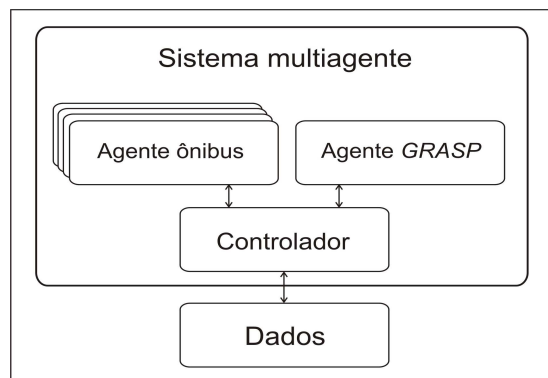


Fig. 1. Visão geral do modelo.

O modelo híbrido proposto utiliza as características positivas destas duas técnicas.

Um SMA pode agregar flexibilidade, inteligência e desempenho a um determinado sistema através da resolução distribuída e concorrente de problemas [10]. Estes aspectos foram considerados relevantes em função da complexidade e as características naturais do problema, as quais exigem métodos especiais que se adaptem às suas necessidades. Através de referências de outros autores como Frank [11], Juchem [12] Causmaecker [13] e Posadas [14], é possível observar que um SMA é apontado como um método que possibilita o tratamento de problemas por intermédio de entidades autônomas, de forma que promove uma especial organização e interação entre estas entidades para atingir um objetivo. Entretanto, as características originais do presente problema de *timetabling*, além de permitirem uma abordagem distribuída, também necessitam de um método especial que proporcione um tipo de arquitetura que

se encaixa com um SMA. Portanto, justifica-se a utilização deste método para esta abordagem. O SMA foi escolhido com a intenção de representar, de forma explícita, o contexto da interação entre ônibus, trajetos, tabelas de horários e variáveis de decisões. Considerando que a literatura aponta esse tipo de problema como de complexidade NP-Hard, julgou-se adequada a utilização da meta-heurística GRASP como método para agregar qualidade às soluções encontradas.

GRASP apresenta particularidades relativas ao desenvolvimento de uma solução inicial seguido de uma busca pelo ótimo global [3]. Estas características são interessantes na qualificação dos resultados de um método de busca local ou de otimização. Portanto, foi considerada relevante para este trabalho a utilização de GRASP pelo fato de unir, em um único ambiente, características gulosas, aleatórias e adaptativas [3];[14];[15].

A meta-heurística GRASP é dependente de outros métodos para o desenvolvimento da busca local que ocorre na sua segunda fase. Estes métodos são normalmente ferramentas de busca local que venham a trabalhar de forma intensa nas soluções geradas na primeira fase [16];[17].

Assim, uma técnica mais complexa que possibilite representar o problema na íntegra torna-se necessária, pois o tratamento dos dados junto da complexidade para tomada de decisão é o ponto principal da abordagem. Neste sentido, a implementação de um SMA permite modelar uma concorrência no preenchimento da tabela de viagens por parte dos ônibus, onde cada um deles é um agente que pode, ou não, assumir um horário na tabela de uma determinada linha. A decisão é totalmente baseada em perguntas que são respondidas por um controlador que centraliza toda a lógica e o acesso aos dados que ficam disponíveis em uma estrutura compartilhada. A decisão é fundamentada na avaliação de vantagens e desvantagens atribuídas ao fato de assumir ou não um novo horário de saída, sendo o objetivo principal de cada agente assumir o maior número de horários possível, consequentemente, diminuir o número total de ônibus necessários para fazer as viagens, sendo este o objetivo global do sistema.

Em função da necessidade de avaliação de muitas variáveis para tomar uma decisão de que um horário é ou não apropriado para determinado agente Ônibus, foi considerado que a utilização de uma arquitetura de comunicação indireta entre agentes é apropriada para o caso, pois desta maneira a

complexidade da comunicação entre os agentes se reduz substancialmente. A implementação de troca de mensagens direta entre agentes, para tratar as necessidades demonstradas pelo problema em questão, resulta em um número muito grande de mensagens, produzindo uma maior complexidade global para o sistema no que diz respeito ao gerenciamento de toda comunicação. Junto a esse fato, está a questão do impacto que seria causado ao desempenho do sistema em função do esforço necessário para fazer o tratamento desse número alto de mensagens.

Com base nos aspectos comentados, na complexidade do problema e no número de variáveis a serem tratadas na tomada de decisão, foi escolhida uma arquitetura de comunicação indireta entre os agentes denominada de *blackboard* [18]. Essa escolha tem o objetivo de diminuir a complexidade e aumentar o desempenho global do sistema, pois dessa forma a troca de mensagens direta entre os agentes é excluída, ficando apenas o contato dos agentes com um único componente que é o **Controlador**.

A avaliação do impacto da decisão é feita exclusivamente pelo módulo **Controlador**, o qual acessa a estrutura de dados e executa testes definindo se um agente **Ônibus** deve ou não assumir um determinado horário. A Figura 2 exibida a seguir descreve a arquitetura do SMA de forma a apresentar, além do modelo de comunicação, os papéis de cada componente do modelo.

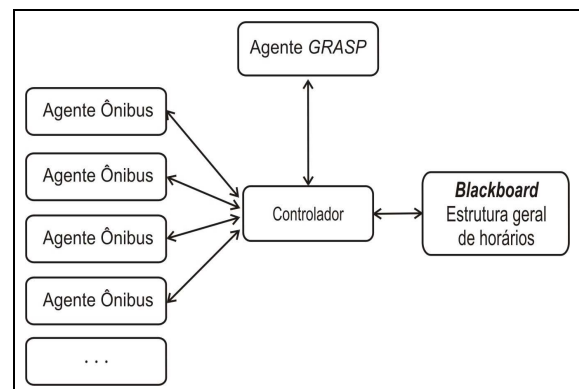


Fig. 2. Arquitetura do SMA.

Com a intenção de descrever de melhor maneira o funcionamento do sistema, juntamente como uma forma de análise das atividades que fazem parte do processo, a Figura 3 é mostrada a seguir representando o diagrama de atividades em UML da primeira solução. Este diagrama descreve as atividades que são realizadas e o fluxo de funcionamento.

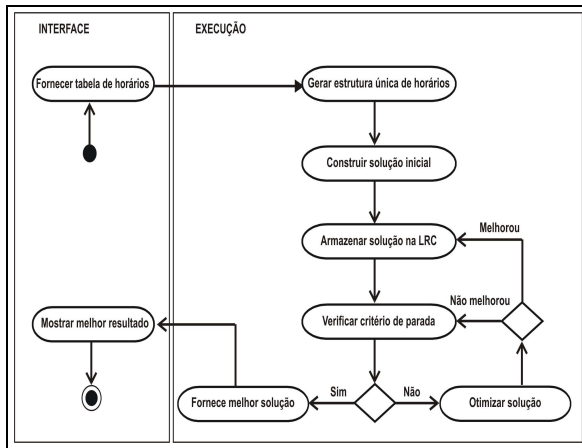


Fig. 3. Diagrama de Atividades.

#### IV. SEGUNDA ABORDAGEM COMPARATIVA UTILIZANDO *SIMULATED ANNEALING*

Como já foi citado, o foco deste estudo em encontrar uma solução globalmente boa gera a necessidade da utilização de métodos que não se prendam ao que chamamos de “ótimos locais” - ou seja, o objetivo do presente trabalho é resolver o problema de forma que nenhuma linha de ônibus fique com mais veículos do que ela realmente precisa. Portanto, se justifica a escolha de uma abordagem probabilística e incremental utilizando *Simulated Annealing (SA)*[19].

Esta heurística SA é um processo probabilístico que utiliza uma metodologia semelhante ao aquecimento de moléculas e seu consecutivo resfriamento de forma lenta. Analogamente, a heurística SA funciona de forma muito semelhante ao processo que ocorre com os átomos de um metal, por exemplo, quando aquecido e resfriado lentamente. Durante o aquecimento, ou já quando está em alta temperatura, os átomos são capazes de se movimentar de maneira frenética e livre. Por outro lado, durante um processo de resfriamento, os átomos tendem a se acomodar e assumir posições estáveis. A heurística funciona da mesma forma, onde no momento que equivale ao aquecimento, ocorrem movimentos aleatórios buscando por soluções em um espaço pré-determinado. Após a execução do programa durante um determinado tempo em alta temperatura, inicia-se o processo de resfriamento, ou seja, ocorre a execução do programa com menor nível de aleatoriedade e velocidade [19].

Para representar o átomo que será agitado/aquecido durante a execução do algoritmo foi utilizado o mesmo **Agente Ônibus** da primeira proposta de solução. O **Agente Ônibus** permanece utilizando a mesma lógica para escolha de horários nas linhas de ônibus. Entretanto, não existe mais o resto da estrutura de controlador, *blackboard* e o incremento da solução implementando GRASP.

A tabela de horários das empresas de ônibus foi distribuída em uma matriz de forma aleatória, sendo que em cada execução os horários eram redistribuídos de maneira diferente.

Os ônibus percorrem a matriz, também aleatoriamente, analisando e assumindo horários nas tabelas de ônibus a fim de assumir o maior número possível de viagens. Por fim, após a execução a matriz é desfeita e as tabelas individuais de cada linha são reconstruídas.

O funcionamento e a arquitetura desenvolvida para a aplicação da heurística SA são mostrados na Figura 4 exibida abaixo, que descreve o papel dos agentes e como foi distribuída a tabela de horários.

H4 L2 BUS	H6 L3	H10L2 BUS	H5 L1	H5 L2 BUS	H1 L1	H9 L1	Hx Ly BUS
H8 L2	H2 L3 BUS	H14 L2	H5 L1	Hx Ly	Hx Ly	Hx Ly	Hx Ly BUS
H15 L2	H8 L3 BUS	H1 L2 BUS	H5 L1	Hx Ly BUS	Hx Ly BUS	Hx Ly	Hx Ly
H7 L2 BUS	H2 L3	H7 L2 BUS	H5 L1	Hx Ly BUS	Hx Ly	Hx Ly	Hx Ly
H18 L2 BUS	H4 L3	H16 L2	H5 L1	Hx Ly	Hx Ly BUS	Hx Ly	Hx Ly
H5 L2	H1 L3 BUS	H19 L2 BUS	H5 L1	Hx Ly	Hx Ly	Hx Ly	Hx Ly
H11 L2	H9 L3	H9 L2	H5 L1	Hx Ly	Hx Ly	Hx Ly BUS	Hx Ly
H4 L1	H17 L3	H6 L2	H5 L1	Hx Ly BUS	Hx Ly BUS	Hx Ly	Hx Ly

Fig. 4. Estrutura de funcionamento *Simulated Annealing*, onde: H = horário (n) e L = linha (n)

#### V. AVALIAÇÃO E RESULTADOS

Para realizar a respectiva avaliação foi necessário analisar os seguintes aspectos relacionados ao sistema desenvolvido:

- **Impacto do número de restrições:** efeito causado ao funcionamento, desempenho e ao resultado final por cada restrição inserida no processo de avaliação na tomada de decisão dos agentes.
- **Desempenho:** tempo necessário para retornar uma solução aceitável ou consideravelmente de qualidade.

- **Qualidade das soluções:** número de ônibus utilizado para suprir as necessidades de um conjunto de linhas de ônibus de uma determinada região.

O sistema proposto neste trabalho foi desenvolvido seguindo o paradigma orientado a objetos, utilizando a linguagem de programação *Java*, *J2SE SDK 1.7* e ambiente de desenvolvimento *Eclipse Indigo*. Os testes ocorreram em um microcomputador Notebook Sony com processador Intel I5 2,30 Ghz, e 4 GB de RAM.

#### A. Dados Utilizados na Pesquisa

Os dados utilizados para os testes foram obtidos através do site da AGERGS [20], do site da Metroplan [21] e contato telefônico com as estações rodoviárias envolvidas. O número de ônibus da Frota Efetiva atual foi obtido através da nota técnica 03/2007 [22]. As linhas de ônibus que executam o transporte naquela região foram identificadas através da nota técnica 01/2007 [8]. As tabelas de horários, nome das linhas de ônibus e itinerários com origem e destino, foram coletados a partir do site da Metroplan [21]. Os tempos de deslocamento de cada trajeto foram obtidos através de contato telefônico com as estações rodoviárias que envolvem os referidos trajetos.

Foram analisadas informações sobre três empresas de ônibus da região nordeste do estado do Rio Grande do Sul chamada, dentro do ambiente de transporte, de aglomeração urbana do nordeste (AUNE): Bento Gonçalves, Ditreto e Ozelame. Cada uma das empresas possui um conjunto de linhas de ônibus com trajetos diferenciados, sendo que cada um dos trajetos possui uma tabela de horários específica. Em cada tabela de horários existe um número variado de horários de saída com diferentes tempos de viagem para percorrer cada trajeto naquele horário. Essas informações são exibidas de maneira organizada e resumida através da Tabela I.

TABELA I. RESUMO SOBRE EMPRESAS E TABELAS DE HORÁRIOS

Empresa	Qtd. Linhas	Quantidade de horários de saída	Tempo de deslocamento por trajeto (minutos)	
			Média tempo deslocamento	Desvio padrão
Bento Gonçalves	38	72	39,46	12,63
Ditreto	18	89	60,83	17,55
Ozelame	16	28	82,14	16,04

Os dados citados na Tabela I são disponibilizados pelos órgãos responsáveis de maneira totalmente descentralizada, pois cada uma destas informações está disponível em diferentes documentos com

diferentes finalidades, tendo exigido então um grande trabalho manual para reunir as informações necessárias para formar o arquivo de entrada de dados para a ferramenta desenvolvida. Este tipo de trabalho normalmente é realizado por especialistas quando da avaliação manual da variável Frota Efetiva.

#### B. Avaliação das restrições e tomada de decisão

Durante os testes preliminares foram utilizados dados e restrições em um número reduzido, de maneira que gradativamente, no momento de verificar se o horário é ou não adequado para um determinado ônibus (trabalho efetuado pelo Agente ônibus), mais restrições ao longo da fase de testes foram sendo adicionadas. Porém, foi observado que o fator relevante não é exatamente o número de restrições, mas sim a ordem que elas são avaliadas. Cada uma das restrições analisadas pode necessitar de diferentes avaliações sobre os dados da estrutura compartilhada, sendo que alguns deles podem exigir um maior esforço computacional ou acesso a parâmetros mais concorridos, de forma que o agente pode ficar bloqueado até a liberação do acesso à informação. Com base nesses aspectos, a definição da ordem de prioridade da avaliação das restrições se torna importante, sendo um fator determinante em relação ao desempenho global.

Em relação ao número de restrições foi possível notar uma considerável diferença de desempenho quando aplicadas desordenadamente sem seguir uma ordem de importância, ou seja, se o módulo controlador não seguir uma determinada lógica ou sequência de verificação no momento de analisar a possibilidade e benefício de um **Ônibus** assumir determinado horário, este processo se torna muito oneroso. Isso ocorre em função de existirem vários **Ônibus** solicitando análises sobre muitos horários concorrentemente. Então para corrigir esse problema seguimos uma ordem de avaliação das restrições que resultou em um desempenho consideravelmente superior ao obtido de maneira desordenada. Esta ordem foi definida por análise de características de acesso aos dados de cada restrição bem como por experimentação. A ordem utilizada que obteve melhores resultados está descrita na Tabela II.

TABELA II. RESTRIÇÕES POR PRIORIDADE

Ordem	Restrição	Restrições a serem avaliadas
1	1	O horário atual já possui um ônibus?
2	2	O ônibus estará livre para este horário?
3	3	O local de origem do horário é igual ao último local de destino deste ônibus?
4	4	O ônibus tem tempo para chegar até o local de origem desse horário?
5	5	O deslocamento deste ônibus até o local de origem é válido?
6	6	Esta linha (trajeto) é da mesma empresa que o ônibus trabalhou por último?

É relevante salientar que para responder cada uma dessas questões foi necessário avaliar mais de um parâmetro. Por exemplo, para avaliar a restrição número dois (o ônibus estará livre para o horário em questão?) é necessário: (1) pesquisar o seu último horário de saída, o tempo de deslocamento de seu último trajeto, (2) somar esses dois valores, então temos o horário que o ônibus estará livre e por fim resta (3) executar uma comparação e verificar se o horário atual de saída em questão é maior (posterior) que o horário que o ônibus estará livre. Como segundo exemplo, para resolver a restrição número quatro (O ônibus tem tempo para chegar até o local de origem desse horário?) é necessário: (1) pesquisar os mesmos dados da restrição número um e efetuar os mesmos cálculos, (2) somar o tempo de deslocamento do local atual do ônibus (último destino) até o local de origem do horário de saída e assim verificar se esse ônibus consegue chegar a tempo até essa referida origem (local de saída).

A Figura 5 apresenta a diferença no desempenho na execução do sistema multiagentes em função da ordem de tratamento das restrições. Portanto, é possível visualizar um grande impacto no desempenho quando as restrições a serem tratadas pelos agentes se encontram em uma ordem não favorável.

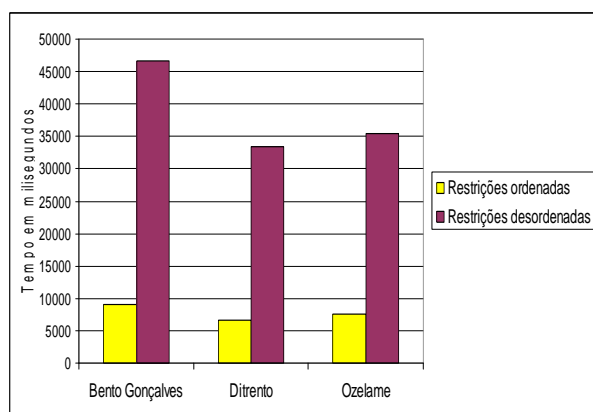


Fig. 5. Comparação por ordem de restrições

## VI. RESULTADOS OBTIDOS

Durante os testes foi observado o comportamento do sistema desenvolvido através de relatórios fornecidos por uma API da linguagem Java conhecida como JAMon (Java Application Monitor) [23]. Através dos relatórios fornecidos por métodos desta API é possível observar algumas informações referentes ao desempenho da execução de um sistema *multithreadin* através da análise de variáveis no próprio código.

Como exemplos de dados que podem ser obtidos estão o número de vezes que uma *thread* executou uma determinada tarefa, o tempo médio que foi necessário para concluir uma tarefa durante todas as vezes que foi executada e o maior e menor tempo gasto na execução de uma tarefa uma única vez. Com base nestes dados foi possível realizar a avaliação detalhada do desempenho do sistema como um todo.

Foram feitos testes e monitoramentos de forma global e também pontual sobre as principais funcionalidades do sistema. Com a intenção de demonstrar o custo computacional de cada fase separadamente durante a execução do primeiro modelo de abordagem (SMA + GRASP), um gráfico com estas informações é mostrado através da Figura 5.

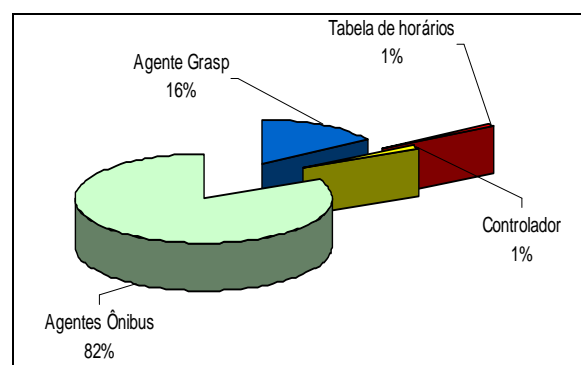


Fig. 5. Comparação do custo de execução na abordagem 1.

Os tempos observados durante os testes e utilizados para elaboração do gráfico da Figura 4 são exibidos na tabela III.

TABELA III. TEMPO DE EXECUÇÃO POR MÓDULOS (MILISEGUNDOS)

Controlador	Tabela de Horários	Agente GRASP	Agente Ônibus	Total
18345	20844	300150	1578656	1917995

É possível notar que a manipulação dos dados representou um custo não muito significativo para o tempo total de execução, bem como o tempo de

execução dos métodos do componente **Controlador**. Entretanto esse comportamento se deve pelo aperfeiçoamento da maneira de atuação sobre o **Controlador** por parte dos agentes, mas principalmente pela configuração dos métodos envolvidos na análise das restrições.

Em relação aos agentes **Ônibus**, representaram a maior parte do tempo de execução em ambas as soluções. Entretanto, em função do aperfeiçoamento do tempo de espera implementado no primeiro modelo de solução (SMA + GRASP) não foi gerado congestionamento, mas sim, uma justiça de acesso aos dados da estrutura compartilhada. Os tempos de espera utilizados pelos agentes foram definidos após o acompanhamento do funcionamento do sistema e da análise de resultados de diversos testes. Porém, este tempo de espera configurado nos agentes **Ônibus**, para promover a qualidade dos resultados e do funcionamento, acaba resultando em um maior tempo de execução por parte dos agentes.

#### A. Análise da qualidade das soluções

A qualidade de uma solução pode ser determinada através da análise de mais de uma característica, ou seja, dependendo da aplicação dos dados gerados, os valores relevantes podem ser diferentes. Por parte da AGERGS, como órgão regulador, é relevante um número baixo de ônibus que atenda as necessidades das tabelas de horários e suas características em benefício da modicidade tarifária.

Os resultados gerados pela ferramenta desenvolvida foram comparados com dados divulgados oficialmente pela AGERGS através de notas técnicas [22]. As Tabelas IV e V comparam os resultados informados pelas empresas, os resultados obtidos pela AGERGS através de processos não automatizados, e os resultados obtidos pelas duas soluções desenvolvidas neste trabalho. Os dados da AGERGS foram obtidos através da Nota Técnica 03/2007 [22].

TABELA IV. RESULTADOS OBTIDOS UTILIZANDO SMA + GRASP

	CADASTRADO	AGERGS	RESULTADO
Bento Gonçalves	23	10	15
Ditrento	15	15	15
Ozelame	25	22	21

TABELA V. RESULTADOS OBTIDOS UTILIZANDO SIMULATED ANNEALING

	CADASTRADO	AGERGS	RESULTADO
Bento Gonçalves	23	10	19
Ditrento	15	15	17
Ozelame	25	22	22

Analisando estes resultados, evidencia-se que a solução que utiliza o SMA + GRASP realmente tem um grau de qualidade superior na abordagem deste caso de *timetabling*. Entretanto, ambas as soluções alcançaram um grau de qualidade satisfatório.

A primeira solução (SMA e GRASP) obteve resultados, para as empresas Ditrento e Ozelame, com um bom desempenho, melhores ou iguais aos obtidos manualmente por especialistas da AGERGS.

Entretanto, para a empresa Bento Gonçalves o resultado foi superior aquele definido pelos profissionais da AGERGS. Em relação a esse fato levamos em consideração que os métodos utilizados pelos reguladores envolvem, entre outras coisas, a experiência do profissional como um especialista. Este aspecto se tornou saliente diante da grande diferença entre o número de ônibus cadastrado pela empresa Bento Gonçalves (23) e pelo número definido pela AGERGS (10), de forma que o número obtido pela ferramenta fica entre os dois resultados anteriores (15).

Contudo, através de uma pesquisa detalhada sobre os serviços prestados pela empresa Bento Gonçalves, foram obtidas informações que revelam que esta é responsável por dois tipos de viagens: ela possui itinerários que fazem parte da aglomeração urbana do nordeste do Rio Grande do Sul, que é o grupo de itinerários estudado pelo presente trabalho, mas também é responsável por rotas chamadas de longo custo. As rotas de longo custo são trajetos de longa distância que podem utilizar o mesmo tipo de veículo que as rotas metropolitanas, de forma que podem ser paralelas aos itinerários metropolitanos e permitem a reutilização ou trocas de veículos entre estes dois tipos de modalidades de serviço.

Conclui-se, assim, que o número de 15 ônibus é realmente adequado para suprir as necessidades da tabela de horários da empresa Bento Gonçalves devido às características de seus trajetos. Entretanto, para alcançar um número próximo ao sugerido pelos especialistas da AGERGS, em casos raros e específicos como este da empresa Bento Gonçalves, é necessária uma pesquisa e verificação junto às empresas de ônibus, pois o número de ônibus que é cadastrado como necessário envolve, entre outras

coisas, valores de remuneração e possibilidades de remanejamento de veículos por parte das empresas.

## CONCLUSÃO

O resultado do presente trabalho representa dois modelos de abordagem que demonstraram qualidade e desempenho aceitável no tratamento deste caso específico de *timetabling*, de forma que se reduziu consideravelmente a complexidade de implementação e modelagem, principalmente no caso do primeiro modelo híbrido proposto, devido à arquitetura utilizada para o desenvolvimento do SMA. Tendo em vista que o objetivo deste estudo foi, acima de tudo, testar a viabilidade da aplicação das técnicas propostas na resolução de problemas de *timetabling*, podemos considerar que o resultado obtido com a segunda solução, utilizando *Simulated Annealing*, também foi positivo.

Entretanto, aliado à contribuição, este estudo produziu uma ferramenta relevante dentro do contexto regulatório do transporte público urbano, sendo aplicável na prática para definir, de maneira mais rápida e eficiente, o número adequado de veículos a serem usados por determinados conjuntos de linhas de ônibus.

Este trabalho sugere que a utilização das técnicas *GRASP* e SMA são válidas e podem trazer bons resultados no tratamento de problemas de *timetabling*. Os dois modelos desenvolvidos através deste trabalho apresentaram qualidade e desempenho satisfatórios quando comparados aos métodos tradicionais utilizados pela AGERGS. De maneira semelhante aos resultados de outros autores encontrados na literatura [1];[24];[25], a utilização de *GRASP* e SMA, através de uma ferramenta híbrida, retornou resultados que podem ser considerados de boa qualidade, tendo em vista que foram iguais ou melhores aos resultados obtidos de maneira não automatizada.

Um ponto importante que pode ser salientado na comparação das duas soluções é o fato da arquitetura de memória compartilhada e a otimização da ordem de abordagem das restrições, no caso do primeiro modelo, serem consideradas um fator determinante em relação ao desempenho.

Adicionalmente, também se tornaram evidentes a aplicabilidade e adaptação da arquitetura do primeiro modelo proposto (SMA + *GRASP*) para problemas de *timetabling*.

Como perspectiva futura, é relevante citar o desenvolvimento de uma interface gráfica apropriada para gestores de empresas de ônibus, bem como para

AGERGS, que possibilite testes diários e com isso um aperfeiçoamento dos parâmetros utilizados na formação das tabelas de horários.

Além disso, a possibilidade de uma estimativa inicial dada pelo usuário via interface, o qual seria baseado na experiência dos especialistas na área, proporcionaria um ganho considerável de desempenho, pois a solução inicial aleatória, bem como alguma adaptação inicial para a utilização de *Simulated Annealing*, poderia já ser gerada muito próxima de um valor ótimo. Os profissionais da área de regulação e gestores de empresas de transporte contribuiriam para aperfeiçoar, entre outras coisas, as restrições utilizadas e consequentemente a geração de novas versões da ferramenta com características específicas de cada empresa.

Assim, seria fornecida uma ferramenta não só de auditoria, mas sim, de auxílio em diferentes aplicações específicas dentro do complexo contexto de trabalho das empresas de transporte.

Por fim, para fins de comparação, também seria válido o desenvolvimento de diferentes abordagens para solucionar este problema de *timetabling* no contexto específico que foi tratado.

## REFERÊNCIAS

- [1] LOBO, M. Uma Solução do problema de horário escolar via algoritmo genético paralelo. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Dissertação de Mestrado, 2005.
- [2] NONOBE, K.; IBARAKI, T. A tabu search approach to the constraint satisfaction problem as a general problem solver. *European Journal of Operational Research*, V. 106, N.2, p. 599-623, 1998.
- [3] COSTA, F., P. Programação de Horários em Escolas via Grasp e Busca Tabu, Universidade Federal de Ouro Preto, Tese de Mestrado, 2003.
- [4] GASPERO, L., MIZZARO, S., SCHAERF, A. A multiagent architecture for distributed course timetabling. In *In Proc. of the 6th International Workshop on Distributed Constraint Reasoning (DCR-05)*, p. 87-100, 2005.
- [5] SMITH, A.; ABRAMSON, D.; DUKE, D. Hopfield neural networks for timetabling: formulations, methods, and comparative results. *Computers & Industrial Engineering* 44, p. 283-305, 2003.
- [6] AZIMI, Z., N. Hybrid heuristics for Examination Timetabling problem. *Applied Mathematics and Computation*, v. 163, n. 2, p. 705-733, 2005.
- [7] AGERGS. Nota Técnica DT 05/2007 - Diretoria de tarifas e plano de estudos financeiros. <http://www.agergs.rs.gov.br>, Relatório Técnico, 2007e.
- [8] AGERGS. Nota Técnica DT 01/2007 - Diretoria de tarifas e plano de estudos financeiros. <http://www.agergs.rs.gov.br>, Relatório Técnico, 2007g.
- [9] AGERGS. Nota Técnica DT 08/2007 - Diretoria de tarifas e plano de estudos financeiros. <http://www.agergs.rs.gov.br>, Relatório Técnico, 2007c.
- [10] JUCHEM, M.; BASTOS, R., M. Engenharia de Sistemas Multiagentes: Uma Investigação sobre o Estado da Arte. PUC-RS, Technical Report Series, number 014, 2004.



- [11] FRANCK, G.; VINCENT, C.; FRANCOIS, C. A reactive multi-agent system for localization and tracking in mobile robotics. IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence, CNRS URA 1376, Universitk de Nice - Sophia Xntipolis, p. 208-214, 2004.
- [12] CAUSMAECKER, P.; OUELHADJ, D.; BERGHE, V. Agents in Timetabling Problems. School of Computer Science and IT, University of Nottingham Jubilee Campus, Nottingham, NG8 1BB, UK, 2005.
- [13] POSADAS, J., L. Agent-based distributed architecture for mobile robot control. Engineering Applications of Artificial Intelligence, V.15, p. 341-350, 2008.
- [14] MAPA, S., M. Redução de custos da programação diária de tripulações de ônibus urbano via metaheurísticas. Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP, Tese de Mestrado, 2004.
- [15] MOURA, A.; SCARAFICCI, R. A GRASP Strategy for a More Constrained School Timetabling Problem. Universidade Estadual de Campinas, Dissertação de Mestrado, 2007.
- [16] RIBEIRO, C.; RESENDE, C. Grasp - Greedy Randomized Adaptive Search Procedures. Journal of Global Optimization, v.6, p. 109-133, 2002.
- [17] TRINDADE, V., A. Proposta e Avaliação Experimental de Heurísticas GRASP para um problema de Escalonamento de Veículos. XXXVI - Simposio Brasileiro de Pesquisa Operacional, 2004.
- [18] JIANG, Y., C. An adaptive adjusting mechanism for agent distributed blackboard architecture. Microprocessors and Microsystems, V. 29, Issue 1, p. 9-20, 2005.
- [19] ABRAMSON, D.; AMORTHY, M.; DANG, H. Simulated annealing cooling schedules for the school timetabling problem. Asia - Pacific Journal of Operational Research, 16, pp 1-22., 1999.
- [20] AGERGS. Agência Estadual de Regulação dos Serviços Públicos Delegados do Rio Grande do Sul. <http://www.agergs.rs.gov.br/>, Relatório Técnico, 2008.
- [21] METROPLAN. Fundação Estadual de Planejamento Metropolitano e Regional. <http://www.metroplan.rs.gov.br/>, site, 2008.
- [22] AGERGS. Nota Técnica DT 03/2007 - Diretoria de tarifas e plano de estudos financeiros. [http://www.agergs.rs.gov.br](http://www.agergs.rs.gov.br/), Relatório Técnico, 2007f.
- [23] JAMON. Java Application Monitor. <http://java-source.net/open-source/profilers/jamon-api>, site, 2008.
- [24] RODRIGUES, M.; SOUZA, C.; MOURA, A. Vehicle and crew scheduling for urban bus lines. European Journal of Operational Research, p. 844-862, 2006.
- [25] POLTOSI, M., R. Elaboração de Escalas de Trabalhos de Técnicos de Enfermagem com Busca Tabu e Algoritmos Genéticos. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Dissertação de Mestrdo, 2007.