

Resolução do Problema de Programação de Horários Escolares Usando Busca Local - Uma Revisão de Literatura

Thiago E. dos Santos¹

thiaagosantos33@gmail.com

Shayane G. Vilela¹

shayanevilella@gmail.com

Antônio R. Santana¹

antonio.santana@ifsudestemg.edu.br

Heber F. Amaral¹

heber.amaral@ifsudestemg.edu.br

¹Instituto Federal De Educação, Ciência E Tecnologia Do Sudeste De Minas Gerais
R. da Independência, 30 - Aparecida, Bom Sucesso - MG, 37220-000

RESUMO

Este artigo apresenta uma Revisão Sistemática de Literatura (RLS) sobre a aplicação de algoritmos de busca local para resolver o problema de programação de horários escolares (*timetabling problem*). A programação eficiente de horários é um desafio complexo devido às diversas restrições e objetivos envolvidos. O problema é classificado como NP-Difícil, sendo comumente abordado por técnicas heurísticas, dentre elas a busca local. A revisão abrange estudos publicados entre 2014 e 2024, focando em diferentes abordagens e metodologias. Além disso, são analisados os *datasets* utilizados, incluindo *benchmarks* públicos como o *International Timetabling Competition* (ITC) e *datasets* próprios. A revisão evidencia a importância da utilização de *benchmarks* padronizados para a reprodutibilidade e comparabilidade das pesquisas, bem como as dificuldades associadas às diferenças nas restrições dos problemas. Os resultados destacam a diversidade de abordagens e a necessidade de soluções adaptativas para lidar com as especificidades de cada contexto.

PALAVRAS CHAVE. Revisão sistemática de literatura, Busca local, Programação de Horários Escolares.

ABSTRACT

This paper presents a systematic literature review on the application of local search algorithms to address the school timetabling problem. Efficiently scheduling timetables is a complex challenge due to the numerous constraints and objectives involved. Classified as NP-Hard, this problem is often tackled using heuristic techniques, with local search being particularly prominent. The review encompasses studies published between 2014 and 2024, examining various approaches and methodologies. It also analyzes the datasets used, including public benchmarks such as those from the International Timetabling Competition (ITC) and proprietary datasets. The review underscores the importance of standardized benchmarks for ensuring the reproducibility and comparability of research, as well as the challenges posed by differing problem constraints. The findings highlight the wide range of approaches and the necessity for adaptive solutions to meet the specific needs of each context.

KEYWORDS. Systematic literature review, Local Search, Timetabling problem

1. Introdução

A programação eficiente de horários de aulas em instituições educacionais é um desafio complexo que envolve a combinação de vários elementos, como disciplinas, professores e salas de aula, levando em consideração diversas restrições e objetivos. A solução manual deste problema é uma tarefa complexa, demorada e frequentemente resulta em soluções subótimas [Bardadym, 1995].

Automatizar o processo de programação de horários proporciona ganhos significativos em eficiência, permitindo encontrar as melhores combinações de recursos e minimizando janelas de tempo ociosas. Isso resulta em uma rotina mais produtiva e maior satisfação dos envolvidos [Brito et al., 2012]. A otimização combinatória permite encontrar as melhores combinações de disciplinas, professores e salas de aula, considerando restrições como preferências de professores, disponibilidade de salas e limitações de tempo. As janelas de tempo entre aulas, sem atividades programadas, podem ser ineficientes e inconvenientes tanto para alunos quanto para professores. Minimizar ou eliminar essas janelas resulta em uma rotina mais fluida e produtiva, contribuindo para a maior qualidade do ensino e para a satisfação dos envolvidos. Assim, é possível reduzir o tempo e os recursos empregados na elaboração dos horários, além de obter uma programação mais eficiente com o uso racional dos espaços.

O problema de programação de horários escolares é um problema de otimização combinatória classificado como NP-Difícil, ou seja, não possui um algoritmo eficiente conhecido para resolver todas as suas instâncias em tempo polinomial, sendo comumente abordado por técnicas heurísticas [Even et al., 1975].

Os métodos usados para resolver problemas de otimização combinatória dividem-se em dois grandes grupos: métodos exatos, cujo objetivo é encontrar a solução ótima de um problema; e métodos heurísticos, que buscam encontrar a melhor solução possível dentro de um determinado tempo considerado viável. Um método heurístico bastante utilizado é chamado de *busca local*, que é o foco deste trabalho. A *busca local* é fundamentada no conceito de vizinhança. O processo de *busca local* considera uma solução inicial viável para o problema e evolui através de operações sobre essa solução com o objetivo de obter melhores soluções viáveis. As soluções geradas a partir de operações sobre uma solução qualquer s são chamadas de soluções vizinhas de s . Seleccionam-se, dentre as soluções vizinhas, soluções melhores do que a solução corrente por algum critério preestabelecido. Esse processo é repetido até que a iteração não gere nenhuma solução de aprimoramento, ou seja, até que a busca converja. A solução final de uma *busca local* é chamada de ótimo local [Aarts et al., 1997].

Esta revisão sistemática de literatura visa explorar as técnicas heurísticas baseadas em *busca local* aplicadas à resolução do problema de *timetabling*, destacando as formulações, abordagens, metodologias e *benchmarks* utilizados na última década.

1.1. Descrição do Problema

A programação de horários, ou *timetabling*, envolve a alocação eficiente de recursos como salas de aula, professores e alunos para diferentes eventos acadêmicos dentro de um período específico, como um semestre ou ano letivo. O objetivo é criar um cronograma que atenda a diversas restrições, incluindo a disponibilidade de recursos, preferências de horário e capacidade das salas [Bashab et al., 2022].

O *High School Timetabling Problem* (HSTP) é uma variação que trabalha com turmas e horários fixos, sem admitir janelas entre os horários. As turmas permanecem na mesma sala, com apenas os professores se deslocando. Já o *University Timetabling Problem* (UCTP) é mais flexível quanto aos horários, salas e professores, permitindo que os alunos pertençam a múltiplas turmas e tolerando janelas entre os horários. O *Post Enrollment Course Timetabling* (PE-CTT) envolve a

alocação de cursos em intervalos de tempo e salas, garantindo que os estudantes possam frequentar todos os cursos em que se inscreveram, sem sobreposições [Goh et al., 2020].

1.2. Objetivos deste Trabalho

Este trabalho tem como objetivo realizar uma revisão sistemática de literatura de trabalhos relacionados a algoritmos de *busca local* para solução dos problemas de agendamento escolar (*Timetabling Problem*), concentrando-se em abordagens heurísticas de *busca local* e suas variações, durante o período de 2014 a 2024.

Devido a diferentes contextos culturais e sistemas educacionais, os problemas de agendamento escolar de ensino médio variam para cada país em termos de requisitos e estrutura de agendamento. Como a evolução do sistema educacional é contínua, novos problemas com novos requisitos aparecem constantemente, exigindo novas metodologias de solução [Post et al., 2012]. Devido à dificuldade em encontrar estudos comparativos entre os algoritmos de *busca local* para solução dos problemas de agendamento escolar quanto ao sucesso das metodologias, desempenho, vantagens, desvantagens e potenciais melhorias, este artigo apresenta uma revisão abrangente e atualizada, bem como uma categorização dos trabalhos de pesquisa mais recentes sobre o problema de agendamento escolar. OS objetivos do trabalho são:

- Fornecer a definição, terminologias e restrições envolvidas no problema de agendamento escolar para promover uma maior compreensão neste domínio.
- Apresentar uma revisão técnica abrangente e uma categorização das metodologias baseadas em *busca local* mais recentes aplicadas a este domínio.
- Delinear os conjuntos de dados de referência para problemas de agendamento escolar de ensino médio e os respectivos métodos de estado da arte.

1.3. Organização do Trabalho

Este artigo está organizado da seguinte forma: A Seção 2 apresenta métodos heurísticos baseados em *busca local*. A Seção 3 discute a literatura relevante sobre problemas de *timetabling*, destacando estudos importantes na área. A Seção 4 detalha a metodologia da revisão sistemática da literatura. A Seção 5 apresenta os resultados da revisão, analisando as abordagens e formulações dos problemas, bem como os *datasets* utilizados nos estudos. Por fim, a Seção 6 conclui o artigo, resumindo os principais achados e discutindo a importância dos *datasets* públicos e próprios para a reprodutibilidade e comparabilidade das pesquisas, além das dificuldades decorrentes das diferenças nas restrições utilizadas nos estudos.

2. Métodos Heurísticos baseados em busca local

Para solucionar o problema, uma das abordagens utilizadas são os métodos heurísticos. Neste trabalho, abordamos exclusivamente métodos heurísticos baseados em *busca local*. Descritas a seguir:

Local Search: A *busca local* é uma técnica heurística de otimização utilizada para encontrar soluções viáveis de um problema baseada em uma solução inicial. A ideia por trás da *busca local* é encontrar soluções vizinhas que são modificadas a cada movimento e verificadas na função objetivo para determinar se a solução vizinha é melhor que a inicial. Caso a solução vizinha seja superior, o programa substitui a solução inicial pela solução vizinha. Esse processo continua até que nenhuma solução melhor seja encontrada [Johnson et al., 1988].

Tabu Search: A *tabu search* é uma técnica baseada em *busca local* que envolve a criação de uma lista de movimentos proibidos. Durante a execução da busca, a *tabu search* se comporta de

maneira semelhante à *busca local*; no entanto, essa abordagem aceita trocar uma solução boa por outra inferior para, no futuro, encontrar a melhor solução possível [Glover e Laguna, 1998].

Variable Neighborhood Search: Proposto por Mladenović e Hansen em 1997, o VNS é amplamente utilizado em problemas de otimização combinatória. Sua execução consiste em explorar diferentes vizinhanças em busca de uma solução ótima, perturbando uma solução corrente e, em seguida, aplicando uma *busca local* em várias vizinhanças variáveis. Durante a execução do algoritmo, a busca é realizada em uma estrutura de vizinhança e, caso não haja melhorias, o algoritmo altera as estruturas vizinhas, escapando de mínimos locais e explorando diferentes regiões do espaço de solução [Mladenović e Hansen, 1997].

Iterated Local Search: A *busca local iterada* opera alternando entre a melhoria local (*local search*) e a perturbação. Na fase da melhoria local, o algoritmo executa uma *busca local* comum, operando nos vizinhos e buscando novas soluções. A fase de perturbação consiste em escapar de ótimos locais subótimos e explorar novas regiões no espaço de busca, executando novamente o processo de melhoria local [Loureiro et al., 2019].

3. Trabalhos Relacionados

A literatura sobre problemas de *timetabling*, que envolve a alocação de aulas em horários de maneira a otimizar o uso de recursos e minimizar conflitos, tem se expandido significativamente nas últimas décadas. Este campo abrange diversos contextos, desde o ensino fundamental até universidades, cada um com suas particularidades e desafios. Dentre os trabalhos relevantes nesta área, pode-se destacar quatro revisões importantes:

- Babaei et al. [2015] categoriza metodologias aplicadas ao problema de *timetabling* de cursos universitários, discutindo suas vantagens, desvantagens e potencial para melhorias futuras. As metodologias incluem algoritmos genéticos, programação linear, *tabu search*, *simulated annealing*, GRASP, VND e hibridizações, com destaque para a predominância de meta-heurísticas e métodos híbridos.
- Tan et al. [2021] fornecem uma revisão abrangente das metodologias de otimização aplicadas, apresentando uma análise comparativa de metodologias, desempenho, vantagens, desvantagens e perspectivas industriais. As técnicas revisadas incluem meta-heurísticas, otimização matemática, heurísticas e métodos híbridos, com um aumento notável na popularidade de métodos de otimização matemática.
- Mais recentemente, no contexto brasileiro, temos o trabalho dos pesquisadores Furtado [2022], que fizeram uma revisão sistemática analisando o problema de alocação de horários escolares no contexto brasileiro, identificando as principais metodologias utilizadas entre 2010 e 2020. O estudo destaca a aplicação prática de algoritmos genéticos, *tabu search*, *simulated annealing* e heurísticas construtivas, com um foco em soluções adaptadas às particularidades das instituições de ensino brasileiras.

Enquanto os estudos relatados exploram uma ampla gama de metodologias, nosso trabalho se concentra nas abordagens de *busca local*, fornecendo uma análise detalhada de suas variações, formulações e *benchmarks* utilizados entre 2014 e 2024, com um olhar específico para as diferenças que influenciam as soluções de *timetabling*.

4. Revisão sistemática de literatura

Para a revisão sistemática de literatura, levantamos as seguintes questões de pesquisa:

- Q-1: Quais técnicas são utilizadas para resolver o problema?

- Q-2: Quais as características dos problemas resolvidos?
- Q-3: Quais as características das instâncias usadas?
- Q-4: Quais os benchmarks usados?

A seleção de fontes foi conduzida de maneira criteriosa para garantir a inclusão de estudos relevantes e de qualidade. A pesquisa foi realizada utilizando o Google Acadêmico como principal motor de busca, devido à sua ampla cobertura de literatura acadêmica em diversas áreas do conhecimento.

4.1. Critérios de Inclusão

Os critérios de inclusão foram:

- Trabalhos relacionados aos problemas de planejamento de horários em escolas e universidades.
- Trabalhos que relatem o uso de *busca local* para solução desses problemas.
- Trabalhos publicados em revistas científicas indexadas com avaliação *Qualis* A1, A2, A3 ou A4.
- Trabalhos publicados na *SBPO*.
- Trabalhos completos.
- Trabalhos de acesso aberto ou disponíveis através dos periódicos *Capes*.
- Trabalhos publicados entre 2014 e 2024.

4.2. Critérios de Exclusão

Os critérios de exclusão foram:

- Trabalhos não relacionados aos problemas de planejamento de horários em escolas e universidades.
- Trabalhos que não relatem o uso de *busca local* para solução desses problemas.
- Trabalhos que não foram publicados em revistas científicas indexadas com avaliação *Qualis* A1, A2, A3 ou A4, ou que não foram publicados nos *proceedings* da *SBPO*.
- Trabalhos incompletos, em andamento, resumos ou resumos estendidos.
- Trabalhos com acesso pago e indisponíveis através dos periódicos *Capes*.
- Trabalhos publicados fora do período de 2014 e 2024.

A *string* de busca foi formulada para abranger sinônimos e variações terminológicas comumente utilizadas na literatura sobre o problema de alocação de horários. Abaixo estão os principais componentes utilizados:

Os **Termos Principais**: "alocação de horários", "*timetabling problem*", "busca local", "*local search*", "VNS", "*Iterated local search*", "ILS", "*Tabu Search*".

Para cobrir um maior número de artigos relacionados aos termos, algumas variações foram adotadas, o que resultou na seguinte *string* de busca:

("high school timetabling problem" OR "university timetabling problem") AND ("local search" OR "VNS" OR "Iterated local search" OR "ILS" OR "Tabu Search").

Ao realizar a pesquisa no Google Scholar para o período de 2014 a 2024 com a palavra-chave "high school timetabling problem", encontramos 412 resultados. Quando refinamos a pesquisa para incluir também "local search", o número de resultados diminuiu para 286. Em contraste, a busca com a palavra-chave "university timetabling problem" retornou 840 artigos, e ao adicionar "local search" como critério adicional, o número de resultados caiu para 460. Apesar da abundância de literatura, ao aplicarmos os filtros de Revisão Sistemática da Literatura (RSL), como qualidade de publicação e relevância ao tema, apenas 19 artigos atenderam às especificações estabelecidas. Os trabalhos que atendem aos critérios da RSL estão listados na Tabela 1.

Tabela 1: Características de todos os trabalhos dos anos de 2014 a 2024

Trabalho	Tipo de abordagem	Formulação
Abuhamdah et al. [2014]	Population based Local Search	UCTP
Cassemiro et al. [2014]	Tabu Search and Genetic Algorithm	HSTP
Fonseca e Santos [2014]	Variable Neighborhood Search	HSTP
Saviniec et al. [2015]	Iterated Local Search	HSTP
Da Fonseca et al. [2016]	Hybrid Local Search	HSTP
Freire e Melo [2016]	Local Search	UCTP
Jardim et al. [2016]	Iterated Local Search	UCTP
Kheiri et al. [2016]	Stochastic Local Search	HSTP
Soria-Alcaraz et al. [2016]	ILS using an add and delete hyper-heuristic	UCTP
Demirović e Musliu [2017]	MaxSAT-based Large Neighborhood Search	HSTP
Goh et al. [2017]	Improved local search	PE-CTT
Saviniec e Constantino [2017]	Local Search	HSTP
Nagata [2018]	Random Partial Neighborhood Search	PE-CTT
Song et al. [2018]	Iterated Local Search	UCTP
Fonseca e Mafia [2020]	Backtracking, Local Search	UCTP
Goh et al. [2020]	Hybrid Local Search	PE-CTT
Song et al. [2021]	Competition-guided Multi-neighborhood Local Search	UCTP
Rezaeipناه et al. [2021]	Improved Parallel Genetic Algorithm and LS	UCTP
Awad et al. [2022]	Adaptive Tabu Search	PE-CTT

5. Resultados

A Tabela 1 fornece uma visão abrangente dos trabalhos de pesquisa publicados entre 2014 e 2024 sobre problemas de *timetabling*, destacando as abordagens utilizadas e as formulações dos problemas abordados. O número reduzido de trabalhos provavelmente se deve ao contraste entre o número de publicações que não atendiam aos critérios de qualidade estabelecidos. Além disso, muitas das publicações que atendiam aos critérios de qualidade apenas citavam a *busca local* sem realmente propor uma abordagem com essa técnica para a solução do problema.

É importante relatar que propor um operador simples de *busca local* para o problema de *timetabling* é consideravelmente mais desafiador do que para problemas clássicos de otimização combinatória, como o *Traveling Salesman Problem* (TSP), *Max-Cut* e *Max-SAT*. Isso se deve à complexidade intrínseca do *timetabling*, que envolve uma maior variedade de restrições rígidas e suaves, além de múltiplas dimensões de alocação (tempo, recursos, preferências). Enquanto operadores de *busca local* para problemas como TSP podem se concentrar em movimentos simples, como trocar a

ordem de visitas em uma rota, o *timetabling* exige operações mais complexas para considerar simultaneamente a compatibilidade de horários, a disponibilidade de salas e a distribuição balanceada de aulas. Essas complexidades adicionais tornam a definição e implementação de operadores de *busca local* para *timetabling* uma tarefa significativamente mais árdua e sofisticada.

Em termos de tipos de abordagem, a *busca local* (*Local Search* - LS) é a técnica mais comum, aparecendo em diversas variantes como *Iterated Local Search* (ILS), *Improved Local Search* e *Population-Based Local Search*. Estas técnicas são amplamente utilizadas devido à sua eficácia em melhorar iterativamente uma solução inicial. Além disso, metodologias híbridas que combinam diferentes técnicas heurísticas e meta-heurísticas, como aquelas vistas nos trabalhos de Goh et al. [2020], Da Fonseca et al. [2016], e Rezaeipanah et al. [2021], são frequentemente utilizadas para aproveitar as vantagens de cada técnica combinada, resultando em melhor desempenho.

Técnicas como *Adaptive Tabu Search*, utilizada por Awad et al. [2022], empregam uma memória adaptativa para evitar ciclos e melhorar a eficiência. A *Variable Neighborhood Search* (VNS), como aplicada em Fonseca e Santos [2014], explora diferentes vizinhanças para escapar de ótimos locais e encontrar soluções de melhor qualidade. Abordagens como *Random Partial Neighborhood Search*, vista em Nagata [2018], focam em explorar sub-regiões aleatórias do espaço de soluções para evitar a convergência prematura. A *MaxSAT-Based Large Neighborhood Search*, utilizada por Demirović e Musliu [2017], combina a formulação de *MaxSAT* com a busca em grande vizinhança para melhorar a eficácia da busca. A abordagem estocástica, como em Kheiri et al. [2016], introduz aleatoriedade na *busca local* para diversificar a exploração do espaço de soluções, enquanto a *Population-Based Local Search*, vista em Abuhamdah et al. [2014], utiliza uma população de soluções e aplica *busca local* para melhorar cada solução. Além disso, a técnica de *Backtracking* combinada com *busca local*, utilizada em Fonseca e Mafia [2020], explora sistematicamente o espaço de soluções, e a combinação de *Tabu Search* e algoritmos genéticos, como em Cassemiro et al. [2014], alavanca as vantagens de ambas as técnicas para melhorar a busca de soluções.

Em termos de formulação do problema, a maioria dos trabalhos aborda o problema de *timetabling* em escolas de ensino médio (*High School Timetabling Problem* - HSTP), refletindo uma necessidade prática significativa. Trabalhos como Saviniec e Constantino [2017], Da Fonseca et al. [2016], Demirović e Musliu [2017], Kheiri et al. [2016], Fonseca e Santos [2014], Saviniec et al. [2015], e Cassemiro et al. [2014] enfocam essa formulação. Outras formulações abordadas incluem o *Post-Enrollment Course Timetabling Problem* (PE-CTT), presente em trabalhos como Goh et al. [2020], Awad et al. [2022], Nagata [2018] e Goh et al. [2017], que foca na alocação de cursos pós-matrícula em contextos universitários. O *University Course Timetabling Problem* (UCTP), abordado em trabalhos como Fonseca e Mafia [2020] Song et al. [2018], Soria-Alcaraz et al. [2016], Abuhamdah et al. [2014], Jardim et al. [2016], e Freire e Melo [2016], envolve a distribuição de cursos em horários e salas disponíveis em universidades, garantindo a eficiência na utilização de recursos e a ausência de conflitos de horário.

Em conclusão, a Tabela 1 revela uma diversidade de abordagens e formulações na pesquisa de *timetabling* ao longo de uma década. A predominância de técnicas de *busca local* e suas variantes, além de metodologias híbridas, destaca a complexidade dos problemas abordados e a necessidade de soluções robustas e adaptativas. As diferentes formulações de problemas, que vão desde o ensino médio até o ambiente universitário, refletem a aplicação prática das técnicas desenvolvidas. Esta diversidade indica um campo de pesquisa ativo e dinâmico, com contínuos avanços e inovações.

A Tabela 2 enumera, dentre os trabalhos pesquisados, o número de trabalhos que utilizaram diferentes *datasets* em suas pesquisas sobre *timetabling*. De acordo com a tabela, o *dataset* ITC

Tabela 2: Número de trabalhos por dataset

Base de dados	Número de trabalhos
ITC 2002	2
ITC 2007	5
ITC 2011	4
Dataset próprio	10

2002 foi utilizado em 2 trabalhos, o ITC 2007 em 5 trabalhos, o ITC 2011 em 4 trabalhos, e *datasets* próprios foram utilizados em 10 trabalhos. É importante notar que a soma dos *datasets* usados (20) é maior que o número total de trabalhos analisados. Isso ocorre porque alguns trabalhos utilizaram mais de um *dataset* em suas pesquisas, permitindo uma avaliação mais abrangente e comparativa de suas abordagens.

A utilização dos *datasets* do *International Timetabling Competition* (ITC) é crucial para o estudo do problema de *timetabling*, pois eles fornecem *benchmarks* padronizados que permitem a comparação objetiva entre diferentes abordagens. Os *datasets* do ITC são amplamente reconhecidos e utilizados na comunidade acadêmica devido à sua padronização e à diversidade de problemas que representam. A presença significativa dos *datasets* ITC 2007 e 2011 nos trabalhos analisados destaca a importância desses *benchmarks* na validação e avaliação das técnicas desenvolvidas. Esses *datasets* fornecem uma base comum que facilita a replicação de estudos e a comparação de resultados. Essa diversidade na escolha dos *datasets* reflete tanto a utilidade dos *benchmarks* padronizados do ITC quanto a necessidade de adaptar as instâncias de problemas para contextos particulares, uma vez que muitos trabalhos são desenvolvidos para atender demandas específicas.

O uso de *datasets* públicos, como os fornecidos pelo *International Timetabling Competition* (ITC), é crucial para a reprodutibilidade e a validação das pesquisas em *timetabling*. *Datasets* públicos padronizados permitem que diferentes pesquisadores avaliem e comparem seus algoritmos em um conjunto consistente de problemas, garantindo que os resultados sejam diretamente comparáveis. Isso promove a transparência e a credibilidade das pesquisas, pois outros pesquisadores podem reproduzir os experimentos e verificar os resultados. Além disso, a utilização de *benchmarks* reconhecidos internacionalmente contribui para o avanço cumulativo do conhecimento, permitindo que as melhorias nas técnicas de otimização sejam avaliadas de maneira objetiva. Em contraste, o uso de *datasets* próprios, embora necessário para certos contextos específicos, pode dificultar a comparação direta entre estudos devido à falta de padronização e à possível ausência de documentação detalhada sobre as características dos dados. Portanto, o equilíbrio entre o uso de *datasets* públicos e próprios é fundamental para o progresso contínuo e a validação robusta das soluções de *timetabling*.

Ao comparar as formulações utilizadas nos trabalhos sobre *timetabling*, especialmente os que abordam o *High School Timetabling Problem* (HSTP), observamos que as restrições apresentam tanto semelhanças quanto diferenças significativas. As semelhanças incluem a necessidade de alocação de tempos e recursos e a consideração da disponibilidade dos recursos, elementos cruciais para a viabilidade das soluções. As diferenças, por outro lado, aparecem principalmente nas restrições fracas, que se concentram em melhorar a qualidade da alocação. Essas restrições fracas envolvem aspectos como a compactação e o balanceamento da agenda dos professores, bem como limites específicos para o número de aulas por dia. Essas distinções refletem a diversidade de objetivos e prioridades nos estudos de *timetabling*, que variam desde a viabilidade básica até a otimização da experiência de professores e alunos.

Abaixo as restrições fortes presente nos trabalhos que abordam HSTP:

- R1:** Nenhum professor pode estar em dois lugares ao mesmo tempo: Um professor não pode ser alocado para mais de uma turma ou sala em um mesmo horário.
R2: Nenhuma sala de aula pode ser utilizada por mais de uma turma simultaneamente: Cada sala deve ser usada apenas por uma turma por vez.
R3: Disponibilidade de professores: Os professores só podem ser alocados em horários nos quais estão disponíveis.
R4: Alocação de disciplinas obrigatórias: As aulas obrigatórias devem ser alocadas dentro do horário escolar, garantindo que todas as disciplinas previstas sejam ministradas.
R5: Limites de capacidade de salas: As turmas alocadas a uma sala devem respeitar o limite de capacidade física do espaço.

Para o *University Course Timetabling Problem* (UCTP), as *hard constraints* são muito semelhantes entre os trabalhos, com pouca variação e uma média de três restrições por estudo, como mostra a tabela 3. No entanto, há uma variação nas *soft constraints*, que são menos críticas para o funcionamento do algoritmo e o resultado final, mas ainda influenciam a qualidade da solução. A quantidade e a definição das *soft constraints* variam significativamente entre os trabalhos, refletindo abordagens diferentes para otimizar a alocação de recursos e horários.

Abaixo as restrições fortes presente nos trabalhos que abordam UCTP:

- R1:** Período: não podem existir duas ou mais disciplinas de um mesmo período no mesmo horário.
R2: Espaço Físico: o total de atividades de um horário e seus respectivos espaços físicos necessários não podem ultrapassar a quantidade especificada.
R3: Disciplina: não podem existir duas ou mais alocações de um determinado professor em um mesmo horário.
R4: Capacidade: O número de alunos matriculados no curso deve ser menor ou igual à capacidade da sala.
R5: Os eventos devem ser atribuídos apenas aos horários predefinidos como disponíveis.
R6: Quando especificado, os eventos devem ser agendados para ocorrer na ordem correta.
R7: Determinam que o número de aulas alocadas de cada turma é menor ou igual ao seu número de aulas práticas.
R8: Para cada evento, deve-se alocar um professor dentre seu conjunto de professores compatíveis.

Tabela 3: Restrições por Trabalhos sobre UCTP

Trabalhos	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8
Abuhamdah et al. [2014]	X	X	X					
Freire e Melo [2016]	X	X	X				X	
Jardim et al. [2016]	X	X	X					
Soria-Alcaraz et al. [2016]	X	X	X		X	X		
Song et al. [2018]	X	X	X					
Fonseca e Mafia [2020] ¹	X	X	X					X
Rezaeiapanah et al. [2021]	X	X	X	X				

¹As restrições R1, R2 e R3 se repetem para os alunos e professores.

Nesse mesmo contexto, as diferenças entre as restrições também dificultam a comparação dos resultados das pesquisas. Essa dificuldade é justificada devido às características dos locais de aplicação das soluções. Mesmo com restrições rígidas iguais nos casos dos HSTP e UCTP, as diferenças nas restrições suaves causam variações nas funções objetivo e também criam problemas

para comparar os resultados das soluções. Portanto, embora as diferenças sejam necessárias para atender às especificidades de cada contexto, elas apresentam desafios adicionais para a avaliação e a replicação dos estudos.

Com realação as difereças entre os modelos, as principais diferenças entre o UCTP e o HSTP estão na flexibilidade dos horários e no movimento de alunos e professores. No UCTP, os alunos têm horários mais flexíveis, com janelas entre aulas sendo permitidas, e precisam se deslocar entre diferentes salas e prédios. Já no HSTP, os alunos seguem um cronograma fixo, com horários completos sem janelas, e geralmente permanecem na mesma sala, enquanto os professores se deslocam. Além disso, no UCTP, os alunos escolhem suas disciplinas, resultando em combinações variadas de horários, enquanto no HSTP as turmas têm um conjunto fixo de disciplinas.

As restrições rígidas também variam: no UCTP, é crucial evitar conflitos de horários entre disciplinas e garantir que as salas comportem os alunos, enquanto no HSTP há um foco maior na rigidez do cronograma dos alunos e na alocação eficiente de professores e salas. As restrições suaves em ambos os casos envolvem minimizar janelas e balancear a carga horária, mas no UCTP isso é mais flexível, enquanto no HSTP há uma necessidade maior de manter um cronograma estruturado.

6. Conclusão

A revisão sistemática da literatura revela uma diversidade de abordagens e formulações de problemas no campo de *timetabling*. A busca local clássica (*Local Search - LS*) é a mais usada, destacada em sete estudos, enquanto a *Variable Neighborhood Search* (VNS) e a *Iterated Local Search* (ILS) aparecem em três e quatro estudos, respectivamente. Propor um operador de busca local para *timetabling* é mais complexo do que para problemas como *TSP* e *Max-SAT* devido às múltiplas restrições e dimensões envolvidas. Abordagens híbridas, que combinam heurísticas e meta-heurísticas, foram utilizadas em quatro estudos.

A maioria dos estudos aborda o problema de *timetabling* de cursos universitários (UCTP), seguido por *timetabling* em escolas de ensino médio (HSTP) e cursos pós-graduação (PE-CTT). Os *datasets* do *International Timetabling Competition* (ITC) são amplamente utilizados para validar técnicas de otimização, embora muitos estudos usem *datasets* próprios para atender a necessidades específicas. Diferenças nas restrições fracas entre os trabalhos dificultam a comparação dos resultados, mas são justificadas pelas características dos contextos de aplicação.

Um trabalho futuro recomendado é implementar e testar os diferentes algoritmos propostos sobre os mesmos *datasets*, obedecendo às mesmas restrições fortes e fracas, com a mesma função objetivo. Assim, estudar a escalabilidade e robustez dos algoritmos em grandes instâncias é essencial para avançar a pesquisa em programação de horários escolares.

Em conclusão, a diversidade de abordagens e a utilização de diferentes *datasets* refletem a complexidade e a necessidade de soluções adaptativas para os problemas de *timetabling*. A combinação de *datasets* públicos e próprios é fundamental para o avanço contínuo e a validação robusta das soluções, garantindo a reprodutibilidade e a comparabilidade das pesquisas. A análise evidencia que o equilíbrio entre essas práticas é essencial para o desenvolvimento de técnicas de otimização eficazes e generalizáveis para problemas de *timetabling*.

Referências

- Aarts, E., Korst, J. H., e van Laarhoven, P. J. (1997). *Simulated annealing*. E. Aarts, JK Lenstra, eds., *Local Search in Combinatorial Optimization*, volume 91120. John Wiley and Sons, New York, NY.
- Abuhamdah, A., Ayob, M., Kendall, G., e Sabar, N. R. (2014). Population based local search for university course timetabling problems. *Applied intelligence*, 40:44–53.

- Awad, F. H., Al-Kubaisi, A., e Mahmood, M. (2022). Large-scale timetabling problems with adaptive tabu search. *Journal of Intelligent Systems*, 31(1):168–176.
- Babaei, H., Karimpour, J., e Hadidi, A. (2015). A survey of approaches for university course timetabling problem. *Computers & Industrial Engineering*, 86:43–59.
- Bardadym, V. A. (1995). Computer-aided school and university timetabling: The new wave. In *international conference on the practice and theory of automated timetabling*, p. 22–45. Springer.
- Bashab, A., Osman, A., Hashem, I., Aggarwal, K., Mukhlif, F., Ghaleb, F., e Abdelmaboud, A. (2022). Optimization techniques in university timetabling problem: Constraints, methodologies, benchmarks, and open issues. *Computers, Materials Continua*, 74:6461–6484.
- Brito, S. S., Fonseca, G. H., Toffolo, T. A., Santos, H. G., e Souza, M. J. (2012). A sa-vns approach for the high school timetabling problem. *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, 39:169–176.
- Cassemiro, M., Miranda, D. S., e Wanner, E. F. (2014). Desenvolvimento de um modelo híbrido baseado em algoritmo genético e busca tabu para resolução do problema de quadro de horários escolar. *Anais do XLVI SBPO*, p. 1870–1878.
- Da Fonseca, G. H. G., Santos, H. G., Toffolo, T. Â. M., Brito, S. S., e Souza, M. J. F. (2016). Goal solver: a hybrid local search based solver for high school timetabling. *Annals of Operations Research*, 239:77–97.
- Demirović, E. e Musliu, N. (2017). Maxsat-based large neighborhood search for high school timetabling. *Computers & Operations Research*, 78:172–180.
- Even, S., Itai, A., e Shamir, A. (1975). On the complexity of time table and multi-commodity flow problems. In *16th annual symposium on foundations of computer science (sfcs 1975)*, p. 184–193. IEEE.
- Fonseca, G. H. G. e Mafia, G. (2020). Um algoritmo heurístico aplicado ao problema de programação de horários universitários do decsi/ufop.
- Fonseca, G. H. e Santos, H. G. (2014). Variable neighborhood search based algorithms for high school timetabling. *Computers & Operations Research*, 52:203–208.
- Freire, J. e Melo, R. (2016). Formulações, heurísticas e um limite combinatório para o problema de alocação de salas de aula com demandas flexíveis. *Anais do XLVIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, 722:729.
- Furtado, R. B. L. (2022). Abordagens para geração de tabelas de horários escolares: uma revisão sistemática da literatura.
- Glover, F. e Laguna, M. (1998). *Tabu Search*. Springer US, Boston, MA. ISBN 978-1-4613-0303-9. URL https://doi.org/10.1007/978-1-4613-0303-9_33.
- Goh, S. L., Kendall, G., e Sabar, N. R. (2017). Improved local search approaches to solve the post enrolment course timetabling problem. *European Journal of Operational Research*, 261(1): 17–29.
- Goh, S. L., Kendall, G., Sabar, N. R., e Abdullah, S. (2020). An effective hybrid local search approach for the post enrolment course timetabling problem. *Opsearch*, 57:1131–1163.

- Jardim, A. M., Semaan, G. S., e Penna, P. H. V. (2016). Uma heurística para o problema de programação de horários: um estudo de caso. *Anais do XLVIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional (SBPO)*.
- Johnson, D. S., Papadimitriou, C. H., e Yannakakis, M. (1988). How easy is local search? *Journal of computer and system sciences*, 37(1):79–100.
- Kheiri, A., Özcan, E., e Parkes, A. J. (2016). A stochastic local search algorithm with adaptive acceptance for high-school timetabling. *Annals of Operations Research*, 239:135–151.
- Lourenço, H. R., Martin, O. C., e Stützle, T. (2019). Iterated local search: Framework and applications. *Handbook of metaheuristics*, p. 129–168.
- Mladenović, N. e Hansen, P. (1997). Variable neighborhood search. *Computers & operations research*, 24(11):1097–1100.
- Nagata, Y. (2018). Random partial neighborhood search for the post-enrollment course timetabling problem. *Computers & Operations Research*, 90:84–96.
- Post, G., Ahmadi, S., Daskalaki, S., Kingston, J. H., Kyngas, J., Nurmi, C., e Ranson, D. (2012). An xml format for benchmarks in high school timetabling. *Annals of Operations Research*, 194: 385–397.
- Rezaeipannah, A., Matoori, S. S., e Ahmadi, G. (2021). A hybrid algorithm for the university course timetabling problem using the improved parallel genetic algorithm and local search. *Applied Intelligence*, 51:467–492.
- Saviniec, L. e Constantino, A. A. (2017). Effective local search algorithms for high school timetabling problems. *Applied Soft Computing*, 60:363–373. ISSN 1568-4946. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1568494617303903>.
- Saviniec, L., Santos, M. O., Costa, A. M., e Aparecido, A. (2015). Multithreading iterated local search aplicado ao problema de horários escolares. In *Proceedings of the Brazilian Symposium on Operations Research, Sobrapo, Rio de Janeiro, Brazil*, p. 826–837.
- Song, T., Chen, M., Xu, Y., Wang, D., Song, X., e Tang, X. (2021). Competition-guided multi-neighborhood local search algorithm for the university course timetabling problem. *Applied Soft Computing*, 110:107624.
- Song, T., Liu, S., Tang, X., Peng, X., e Chen, M. (2018). An iterated local search algorithm for the university course timetabling problem. *Applied Soft Computing*, 68:597–608.
- Soria-Alcaraz, J. A., Özcan, E., Swan, J., Kendall, G., e Carpio, M. (2016). Iterated local search using an add and delete hyper-heuristic for university course timetabling. *Applied Soft Computing*, 40:581–593.
- Tan, J. S., Goh, S. L., Kendall, G., e Sabar, N. R. (2021). A survey of the state-of-the-art of optimisation methodologies in school timetabling problems. *Expert Systems with Applications*, 165:113943.