

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE COMPUTAÇÃO  
CURSO DE ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO

ALLAN WENDLAND KRETZMANN

**GERAÇÃO DE GRADES HORÁRIAS ESCOLARES: AUTOMAÇÃO  
COM BASE NA META-HEURÍSTICA SIMULATED ANNEALING**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO  
2023

ALLAN WENDLAND KRETZMANN

## **GERAÇÃO DE GRADES HORÁRIAS ESCOLARES: AUTOMAÇÃO COM BASE NA META-HEURÍSTICA SIMULATED ANNEALING**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Computação da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Computação.

Orientador: André Yoshiaki Kashiwabara  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**CORNÉLIO PROCÓPIO  
2023**



4.0 Internacional

Esta é a mais restritiva das seis licenças principais Creative Commons. Permite apenas que outros façam download dos trabalhos licenciados e os compartilhem desde que atribuam crédito ao autor, mas sem que possam alterá-los de nenhuma forma ou utilizá-los para fins comerciais.

## RESUMO

KRETZMANN, Allan. Geração de Grades Horárias Escolares: Automação com base na meta-heurística Simulated Annealing. 2023. 65 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia de Computação, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2023.

O *High School Timetabling Problem* consiste na tarefa de alocar aulas a horários letivos em instituições de ensino, considerando restrições relacionadas aos professores, salas e disciplinas. Apesar de todos os avanços tecnológicos que experenciamos na atualidade, esta tarefa ainda é realizada primordialmente de maneira manual nas escolas brasileiras, produzindo grades horárias subótimas e consequentemente trazendo frustrações a todos os envolvidos, sejam estes alunos, docentes ou diretores. Todas as dificuldades relacionadas ao problema, somadas a novos desafios como os Itinerários Formativos do Novo Ensino Médio, pedem uma solução melhor. Este trabalho teve como objetivo implementar um sistema de geração automatizada das grades horárias atendendo o maior número de objetivos possível, através da aplicação de um algoritmo de otimização baseado na meta-heurística *Simulated Annealing*, técnica de otimização inspirada no processo de recozimento de materiais na metalurgia. A solução desenvolvida é uma aplicação *web* que segue uma arquitetura cliente-servidor empregando JavaScript no *frontend* e *backend*, além do otimizador desenvolvido na linguagem C++. Espera-se que a aplicação desenvolvida passe a fazer parte do ferramental de instituições de ensino e auxilie estas a entregar horários escolares que superem os diversos desafios associados e providenciem uma experiência melhor para todos.

**Palavras-chave:** High School Timetabling Problem. Simulated Annealing. Otimização multiobjetivo.

## ABSTRACT

KRETZMANN, Allan. School Timetable Generation: Simulated Annealing based Generation. 2023. 65 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia de Computação, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2023.

The High School Timetabling Problem involves the task of assigning classes to class periods in educational institutions while considering constraints related to teachers, classrooms, and subjects. Despite the technological advancements we experience today, this task is still primarily done manually in brazilian schools, resulting in suboptimal timetables and frustrations for all stakeholders, including students, teachers, and administrators. The difficulties associated with the problem, combined with new challenges provided by the new high school model implemented in the country, call for a better solution. This study has aimed to implement an automated timetabling system that satisfies as many objectives as possible by applying an optimization algorithm based on the Simulated Annealing metaheuristic, a technique inspired by the annealing process in metallurgy. The developed solution is a web application following a client-server architecture, employing JavaScript for both the frontend and backend, in addition to the optimizer implemented in the C++ language. We hope that the developed application becomes part of the toolkit for educational institutions and helps them deliver school timetables that overcome the various associated challenges and provide a better experience for all parties involved.

**Keywords:** High School Timetabling Problem. Simulated Annealing. Multi-objective optimization.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Algoritmo genérico de Simulated Annealing . . . . .	7
Figura 2 – Aulas constantes . . . . .	10
Figura 3 – Restrições . . . . .	11
Figura 4 – Limites de dias trabalhados por professor . . . . .	12
Figura 5 – Exemplo de região . . . . .	13
Figura 6 – Exemplo de grupo de alinhamento configurado . . . . .	14
Figura 7 – Efeito de grupo de alinhamento . . . . .	15
Figura 8 – Configuração de preferências . . . . .	16
Figura 9 – Mínimos de aulas configuradas na interface . . . . .	17
Figura 10 – Modelo Entidade-Relacionamento . . . . .	20
Figura 11 – Consultas de validação da modelagem . . . . .	21
Figura 12 – Resultado da consulta de uma grade no banco de dados . . . . .	21
Figura 13 – Diagrama de Casos de Uso . . . . .	22
Figura 14 – Tela - Listagem de Configurações de Grade . . . . .	23
Figura 15 – Tela - Estrutura da Escola - Professores . . . . .	24
Figura 16 – Tela - Estrutura da Escola - Turmas e Turnos . . . . .	24
Figura 17 – Tela - Aulas por professor . . . . .	25
Figura 18 – Tela - Constantes . . . . .	25
Figura 19 – Tela - Restrições e Preferências . . . . .	26
Figura 20 – Tela - Regiões e Grupos de Alinhamento . . . . .	26
Figura 21 – Tela - Mínimos e Máximos . . . . .	27
Figura 22 – Tela - Horários . . . . .	27
Figura 23 – Modelo Entidade-Relacionamento com adição da tabela de usuários . . . . .	28
Figura 24 – Tela de Acesso . . . . .	29
Figura 25 – Método de Cadastro . . . . .	30
Figura 26 – Método de Login . . . . .	31
Figura 27 – Middleware de autenticação . . . . .	32
Figura 28 – Middleware de validação da configuração . . . . .	32
Figura 29 – Modelo Entidade-Relacionamento com Matérias . . . . .	34
Figura 30 – Estrutura da Escola com Matérias . . . . .	35
Figura 31 – Tela de configuração de quantidades de aulas por matéria . . . . .	35
Figura 32 – Visualização de grade horária com matérias . . . . .	36
Figura 33 – Mensagem de erro de validação . . . . .	38
Figura 34 – Grade horária exportada para planilha . . . . .	39
Figura 35 – Grade horária exportada para planilha . . . . .	40
Figura 36 – Grade horária exportada para planilha . . . . .	40
Figura 37 – Constantes configuradas na interface . . . . .	43
Figura 38 – Restrições e preferências configuradas na interface . . . . .	44
Figura 39 – Regiões e grupos de alinhamento configuradas para o turno da “Manhã” . . . . .	45
Figura 40 – Regiões e grupos de alinhamento configuradas para o turno da “Tarde” . . . . .	45
Figura 41 – Mínimos de aulas configuradas na interface . . . . .	46
Figura 42 – Visualização de turno da manhã da melhor solução . . . . .	47
Figura 43 – Grade exportada - Turno da Manhã . . . . .	48
Figura 44 – Grade exportada - Turno da Tarde . . . . .	48
Figura 45 – Grade exportada - Solução para a instância Brazillnstance1 . . . . .	52

Figura 46 – Relatório produzido pelo HSEval para a solução apresentada . . . . .	53
Figura 47 – Relatório HSeval comparativo das soluções para a Brazillnstance1 . . . . .	53
Figura 48 – Grade exportada - Solução para a instância Brazillnstance5 . . . . .	56
Figura 49 – Relatório produzido pelo HSEval para a solução apresentada . . . . .	57
Figura 50 – Relatório HSeval comparativo das soluções para a Brazillnstance5 . . . . .	57
Figura 51 – Solução para a instância Brazillnstance7 - Turmas S1 a S10 . . . . .	61
Figura 52 – Solução para a instância Brazillnstance7 - Turmas S11 a S20 . . . . .	61
Figura 53 – Relatório produzido pelo HSEval para a solução apresentada . . . . .	62
Figura 54 – Relatório HSeval comparativo das soluções para a Brazillnstance7 . . . . .	62

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 – Exemplo de dia com aulas separadas. . . . .	9
Quadro 2 – Exemplo de dia fragmentado. . . . .	9
Quadro 3 – Exemplo de dia com janela. . . . .	16
Quadro 4 – Métricas de qualidade da melhor solução. . . . .	47
Quadro 5 – Limite de dias trabalhados por professor - BrazillInstance5. . . . .	55
Quadro 6 – Limite de dias trabalhados por professor - BrazillInstance7. . . . .	60

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Configuração de aulas para validação . . . . .	42
Tabela 2 – Configuração de Aulas - BrazilInstance1 . . . . .	51
Tabela 3 – Configuração de Aulas - BrazilInstance5 . . . . .	54
Tabela 4 – Configuração de Aulas das turmas S1 a S10 - BrazilInstance7 . . . . .	58
Tabela 5 – Configuração de Aulas das turmas S11 a S20 - BrazilInstance7 . . . . .	59

## **LISTA DE ALGORITMOS**

Algoritmo 1 – Otimizador de grades inicial . . . . .	6
Algoritmo 2 – Otimizador com persistência de grades horárias . . . . .	18
Algoritmo 3 – Otimizador com alocação de matérias . . . . .	37

## SUMÁRIO

<b>1 – INTRODUÇÃO . . . . .</b>	<b>1</b>
1.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA . . . . .	1
1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS . . . . .	1
1.3 OBJETIVOS . . . . .	2
1.3.1 Objetivo Geral . . . . .	2
1.3.2 Objetivos Específicos . . . . .	2
1.4 ESTRUTURA ORGANIZACIONAL . . . . .	2
<b>2 – REVISÃO DE LITERATURA . . . . .</b>	<b>3</b>
2.1 TIMETABLING PROBLEM . . . . .	3
2.1.1 Highschool Timetabling Problem . . . . .	3
2.2 NOVO ENSINO MÉDIO . . . . .	3
2.3 SIMULATED ANNEALING . . . . .	4
<b>3 – DESENVOLVIMENTO . . . . .</b>	<b>5</b>
3.1 RECURSOS UTILIZADOS . . . . .	5
3.2 MÉTODOS . . . . .	5
3.3 ANÁLISE E IMPLEMENTAÇÃO . . . . .	6
3.3.1 Otimizador inicial . . . . .	6
3.3.2 PESOS E RESTRIÇÕES . . . . .	8
3.3.2.1 Agrupamento de aulas . . . . .	8
3.3.2.2 Constantes . . . . .	10
3.3.2.3 Restrições . . . . .	11
3.3.2.4 Limite de dias trabalhados . . . . .	11
3.3.2.5 Regiões . . . . .	12
3.3.2.6 Grupos de Alinhamento . . . . .	14
3.3.2.7 Janelas . . . . .	16
3.3.2.8 Preferências . . . . .	16
3.3.2.9 Mínimos e máximos . . . . .	17
3.3.2.10 Armazenamento de soluções . . . . .	17
3.3.3 SERVIDOR E BANCO DE DADOS . . . . .	19
3.3.4 INTERFACE . . . . .	22
3.3.5 USUÁRIOS E AUTENTICAÇÃO . . . . .	28
3.3.5.1 Adaptação do banco de dados . . . . .	28
3.3.5.2 Tela de login . . . . .	29
3.3.5.3 Rotas de autenticação . . . . .	29
3.3.5.4 Middlewares . . . . .	31
3.3.6 ALOCAÇÃO DE MATÉRIAS . . . . .	33
3.3.6.1 Alteração no banco de dados . . . . .	34
3.3.6.2 Alteração de telas . . . . .	34
3.3.6.3 Alteração de métodos no servidor . . . . .	36
3.3.6.4 Matérias no otimizador . . . . .	36
3.3.7 VALIDAÇÃO DE CONFIGURAÇÕES . . . . .	38
3.3.8 EXPORTAÇÃO DE GRADES HORÁRIAS . . . . .	39

<b>4 – ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b>	<b>41</b>
4.1 VALIDAÇÃO INTERNA	41
4.2 VALIDAÇÃO COM DATASETS PÚBLICOS	50
4.2.1 Instância 1	51
4.2.2 Instância 2	54
4.2.3 Instância 3	58
<b>5 – CONCLUSÃO</b>	<b>63</b>
<b>Referências</b>	<b>64</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A cada ano letivo, se faz necessária a definição de grades horárias que atendam inúmeros requisitos para o bom funcionamento das mais diversas instituições de ensino. Estas exigências dependem e impactam diretamente os envolvidos, sejam estes professores, alunos, gestores, ou ainda, os responsáveis pelo planejamento dos horários. Os requisitos citados anteriormente podem mudar durante o ano, requerendo constantes atualizações das grades definidas. Esta tarefa, segundo [Bardadym \(1996\)](#), requer grande esforço quando realizada manualmente, frequentemente resultando em soluções subótimas.

Para o desenvolvimento dos horários escolares, vários critérios devem ser considerados, como o número de aulas de cada professor, salas, turnos, além das restrições associadas a cada professor em particular. A combinação destes fatores para a produção de um horário otimizado é conhecida como *school timetabling problem* ([FONSECA; SANTOS; CARRANO, 2016](#)). Para a escrita deste trabalho, foi realizada a leitura de artigos que abordam o tema em questão, neste modo os autores [Fonseca, Santos e Carrano \(2016\)](#), [Tan et al. \(2021\)](#) e [Abramson \(1991\)](#) se mostraram imprescindíveis para a sua realização.

Ao decorrer da revisão bibliográfica, foi reafirmada a relevância desta pesquisa e da elaboração de um projeto que solucione o problema, dada a complexidade e recorrência deste. [Poulsen \(2012\)](#) estima que a maioria das instituições de ensino brasileiras efetua essa tarefa de maneira manual, o que implica em atrasos para as escolas, além de desgaste entre os docentes envolvidos nas negociações de restrições. Isto justifica novamente a necessidade de uma solução automatizada que entregue grades otimizadas em um tempo hábil.

Diante deste contexto, fica evidente a necessidade de solucionar o seguinte problema: como automatizar a geração de grades horárias que atendam as diversas demandas das instituições de ensino? Por ser um problema combinatório, consideram-se técnicas viáveis *Simulated Annealing*, Busca Tabu, Algoritmos Genéticos, entre outros ([TAN et al., 2021](#)).

### 1.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA

O presente trabalho visa abordar o tema de otimização de grades horárias escolares, tendo em mente especificamente as necessidades de instituições brasileiras de ensino fundamental e médio.

### 1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS

Como mencionado anteriormente, as instituições de ensino necessitam de constantes atualizações de suas grades horárias. Este processo envolve muitas variáveis, e impacta diretamente alunos, professores e gestores. Devido a esta complexidade, o problema já é conhecido na literatura como *school timetabling problem*, sendo dividido nos tipos *exam timetabling*, *course timetabling* e *high school timetabling* ([TAN et al., 2021](#)). Este trabalho tem como foco esta última variação, que, segundo os mesmos autores, é definido em termos da disponibilidade dos professores, número de salas, número de aulas por professor em cada sala e restrições.

### 1.3 OBJETIVOS

#### 1.3.1 Objetivo Geral

Desenvolver uma aplicação que automatize e simplifique o processo de criação de grades horárias escolares, otimizando diferentes características de qualidade destas, fazendo com que tais sejam livres de conflitos e atendam a restrições impostas pelas instituições de ensino.

#### 1.3.2 Objetivos Específicos

1. Compreender quais são as reais necessidades das escolas quanto ao planejamento de grades horárias;
2. Implementar métricas de qualidade para os horários, que refletem se as necessidades são atendidas com êxito;
3. Aplicar um algoritmo de otimização na geração de grades que evite conflitos, atenda restrições de horários dos docentes, minimize a quantidade de janelas nas aulas dos professores, faça agrupamentos formando aulas duplas e evite excessos da mesma aula;
4. Proporcionar uma experiência do usuário simples e agradável durante o uso da aplicação.

### 1.4 ESTRUTURA ORGANIZACIONAL

O trabalho em questão está estruturado da seguinte forma: o capítulo 1 traz a introdução sobre o tema, uma visão geral sobre a pesquisa e seus objetivos; no capítulo 2 será desenvolvida a fundamentação teórica, listando todas as fontes de conhecimento consultadas para o desenvolvimento do projeto; a forma de implementação do projeto, seus materiais e métodos serão discutidos no capítulo 3; o capítulo 4 apresentará os resultados do projeto, e o capítulo 5 trará as considerações finais.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

Este capítulo tem como objetivo explicar o problema de *timetabling* e suas especificidades no caso de grades horárias de ensino médio, assim como a técnica de otimização *Simulated Annealing* e sua aplicação ao problema.

### 2.1 TIMETABLING PROBLEM

O problema de *timetabling* ou alocação de horários é definido em termos de quatro conjuntos, sendo estes horários, recursos, encontros e restrições. Envolve a tarefa de associar os encontros desejados aos horários, utilizando os recursos disponíveis e minimizando as violações das restrições.

É evidente que existem inúmeras tarefas e indústrias que dependem da alocação de horários, portanto é necessário especializar o problema. Uma das variações deste problema é o *school timetabling problem*, que segundo [Tan et al. \(2021\)](#) subdivide-se em *exam timetabling*, *course timetabling* e *high school timetabling*. Esta última subdivisão, relacionada a escolas de ensino médio, será o foco deste trabalho.

#### 2.1.1 Highschool Timetabling Problem

No caso específico da alocação de horários para escolas de ensino médio, o problema é definido em termos da disponibilidade dos professores, número de salas, número de aulas por professor em cada turma e restrições. Adequando estas necessidades à formulação do *timetabling problem*, os encontros que desejamos alocar são entre os professores e as turmas, dados os horários de aula em que a escola opera, visando a utilização dos recursos disponíveis, como salas de aula ou laboratórios, minimizando a violação de restrições associadas aos professores e recursos ([TAN et al., 2021](#)).

Segundo [Abramson \(1991\)](#), o problema envolve agendar aulas, professores e salas de aula de tal forma que nenhum professor, turma ou sala de aula seja utilizado mais de uma vez em determinado horário. Situações em que ocorra este agendamento de recursos duplicados serão tratadas como “conflitos” neste trabalho.

Levando em consideração a necessidade de agendar diversas aulas evitando conflitos, e o atendimento de restrições variadas, o *highschool timetabling problem* é um problema de otimização multiobjetivo, que segundo [Cooper e Kingston \(1995\)](#) é da classe NP-completo.

Considerando a natureza complexa do problema, este trabalho propõe desenvolver e analisar a eficiência de um algoritmo de *Simulated Annealing*, assim como implementar uma interface para interação com este.

### 2.2 NOVO ENSINO MÉDIO

O Novo Ensino Médio consiste na atualização das matrizes curriculares das salas desta etapa do sistema educacional (1º, 2º e 3º anos). Formulado através da Lei nº 13.415/2017, o novo modelo traz ainda mais desafios para a tarefa de organização de grades horárias escolares ([BRASIL, 2017](#)).

O principal destes novos desafios no contexto da criação de grades horárias é o conceito dos Itinerários Formativos, conjuntos de atividades que os estudantes podem escolher realizar durante o ensino médio, como disciplinas, projetos, oficinas, entre outros.

No caso de grandes instituições de ensino, é possível que seja viável oferecer essas atividades optativas através da criação de turmas específicas, entretanto, em escolas de pequeno porte, a adição destas turmas e quantidade relativamente pequena de estudantes por turma pode facilmente desgastar os recursos da instituição.

Tendo estas limitações em mente, observou-se que uma estratégia aplicada por escolas de menor porte é a oferta de disciplinas optativas (Itinerários Formativos) em horários simultâneos em diferentes salas, nos períodos normais de ensino. No momento em que essas aulas acontecem, cada aluno das duas turmas se locomove para a sala adequada onde a aula que escolheu será ministrada, e com isso a escola não precisa alocar salas, professores ou horários adicionais.

Evidentemente, alocar horários simultâneos para determinadas aulas dificulta ainda mais o planejamento do horário escolar, sendo assim mais uma questão que pode ser auxiliada por um sistema de otimização de grades.

### 2.3 SIMULATED ANNEALING

Diversos problemas podem ser resolvidos imitando o que ocorre em fenômenos físicos ou naturais. Segundo [Laarhoven \(1987\)](#), *Simulated Annealing* é uma meta-heurística que se inspira no processo de recocimento na área da metalurgia. Este processo tem como objetivo reduzir as tensões internas de determinado material, da seguinte forma:

1. O material inicia com uma alta temperatura, com seus átomos desordenados e livres para vibrarem e se deslocarem;
2. O sistema é resfriado gradualmente, fazendo com que os átomos encontrem posições cada vez mais estáveis. Em outras palavras, conforme a temperatura diminui, torna-se cada vez mais improvável um átomo se deslocar para uma posição menos estável;
3. Por fim, atinge-se certa temperatura em que não ocorrem mais mudanças significativas no material.

Esta meta-heurística foi escolhida para o desenvolvimento deste trabalho considerando seu potencial verificado durante a revisão de literatura, e a clareza dos paralelos que podem ser realizados com o processo de têmpera real: os átomos representam os professores e aulas, que podem ser deslocados na grade horária até que atinjam uma posição estável, ou seja, que viole o mínimo possível de restrições do problema.

### 3 DESENVOLVIMENTO

Este capítulo tem como objetivo evidenciar todas as atividades executadas durante o desenvolvimento do projeto. A [Seção 3.1](#) apresentará uma listagem dos *softwares* utilizados no desenvolvimento do projeto; a [Seção 3.2](#) explicitará o método de desenvolvimento, e a [Seção 3.3](#) evidenciará a execução das atividades propriamente ditas.

#### 3.1 RECURSOS UTILIZADOS

Tratando-se do desenvolvimento de um projeto *full stack*, utilizaram-se diversas tecnologias e ferramentas, sendo as de maior importância:

- **VSCode**: Editor de código-fonte desenvolvido pela Microsoft, escolhido por sua versatilidade e aplicabilidade para desenvolver todos os componentes do sistema;
- **DBeaver**: Ferramenta de código aberto de administração de bancos de dados, utilizada para validação da modelagem e interações manuais com a base de dados;
- **PostgreSQL**: Sistema gerenciador de banco de dados relacional, escolhido por sua robustez, possibilitará a persistência dos dados da aplicação em tabelas;
- **JavaScript**: Linguagem de programação ubíqua na engenharia de software, escolhida por sua versatilidade para desenvolver a interface *web* e servidor;
- **VueJS**: *Framework* para desenvolvimento frontend na linguagem JavaScript, escolhido por sua versatilidade e familiaridade do graduando com este;
- **VuetifyJS**: *Framework* de componentes e estilização para o VueJS, utilizado para padronizar o design da aplicação;
- **NodeJS**: *Runtime* de JavaScript que permite a utilização dessa linguagem para escrever aplicações no lado do servidor;
- **ExpressJS**: *Framework* para desenvolvimento backend na linguagem JavaScript, utilizando a plataforma NodeJS;
- **C++**: Linguagem de programação compilada, escolhida por sua alta performance para o desenvolvimento do otimizador;
- **G++**: Compilador utilizado para converter o código fonte em C++ do otimizador para um arquivo executável;
- **GDB**: Debugador da linguagem C++, utilizado para localizar problemas no código fonte do otimizador.

#### 3.2 MÉTODOS

Para o processo de software da aplicação, optou-se pelo processo de desenvolvimento incremental. Este processo consiste na divisão da implementação do projeto em incrementos, os quais são executados linearmente, porém de forma escalonada ([PRESSMAN; MAXIM, 2016](#)).

Este processo de software foi escolhido por possibilitar o planejamento de execução do projeto em etapas lógicas, que podem ser sobrepor através de escalonamento, de acordo com as necessidades encontradas. Conforme os requisitos levantados na seção anterior, dividiram-se as tarefas de desenvolvimento nos incrementos pertinentes:

- **Incremento 1**: Desenvolvimento inicial do otimizador, aplicando Simulated Annealing apenas para a resolução de conflitos;
- **Incremento 2**: Implementação de restrições no otimizador;
- **Incremento 3**: Criação do servidor e banco de dados;

- **Incremento 4:** Desenvolvimento da interface web;
- **Incremento 5:** Adição do sistema de usuários;
- **Incremento 6:** Adaptação da modelagem para incluir matérias aos horários alocados pelo otimizador;
- **Incremento 7:** Implementação de validações das configurações de grade inseridas pelo usuário;
- **Incremento 8:** Desenvolvimento de sistema de exportação de grades horárias.

### 3.3 ANÁLISE E IMPLEMENTAÇÃO

#### 3.3.1 Otimizador inicial

Segundo Abramson (1991), uma parte fundamental para a produção de grades horárias escolares é a resolução de conflitos de recursos. Estes conflitos são caracterizados por recursos alocados simultaneamente, levando a grades horárias não aplicáveis na prática. Um exemplo disso é a alocação de um professor para ministrar aulas para mais de uma turma ao mesmo tempo, o que é impossível.

Neste projeto, a primeira parte desenvolvida foi a versão inicial do otimizador, cuja tarefa era gerar uma grade horária válida, evitando conflitos, ou seja, professores alocados para mais uma turma ao mesmo tempo. O algoritmo 1 representa esta primeira versão do otimizador, cuja implementação foi baseada no algoritmo genérico de *Simulated Annealing* proposto por Laarhoven (1987), visível na figura 1.

---

#### **Algoritmo 1:** Otimizador de grades inicial

---

**Input:** Lista de professores  $LP$ , lista de turmas  $LT$ , matriz de aulas por professor por turma  $MA$ , temperatura inicial  $TI$ , Taxa de resfriamento  $TR$

**Output:** Grade horária de professores otimizada

```

temperatura ← TI
grade ← CriaGradeInicial( $LP, LT, MA$ )
minConflitos ← NumeroConflitos( $grade$ )
while condição de parada não atingida do
    for passo = 0 até numeroPassos do
        turma ← EscolheTurmaAleatoria()
        linhas ← EscolheHorariosAleatoriosValidos( $turma$ )
        delta ← CalculaDelta( $turma, linhas$ )
        probabilidade ←  $e^{-\delta/\text{temperatura}}$ 
        valorAceite ← Aleatorio(0, 1)
        if  $\delta < 0$  ou probabilidade ≥ valorAceite then
            PermutaProfessores( $turma, linha1, linha2$ )
            if NumeroConflitos( $grade$ ) < minConflitos then
                Imprime( $grade$ )
                minConflitos ← NumeroConflitos( $grade$ )
            end
        end
    end
    temperatura ← temperatura *  $TR$ 
end

```

---

Figura 1 – Algoritmo genérico de Simulated Annealing

**PROCEDURE SIMULATED ANNEALING****begin****INITIALIZE;****M := 0;****repeat****repeat****PERTURB(config.  $i \rightarrow$  config.  $j, \Delta C_{ij}$ );****if  $\Delta C_{ij} \leq 0$  then accept else****if  $\exp(-\Delta C_{ij}/c) > \text{random}[0,1]$  then accept;****if accept then UPDATE(configuration  $j$ );****until equilibrium is approached sufficiently closely;** **$c_{M+1} := f(c_M)$ ;** **$M := M + 1$ ;****until stop criterion = true (system is ‘frozen’);****end.**Fonte: Figura 2.1 de [Laarhoven \(1987\)](#)

No algoritmo 1, o valor da taxa de resfriamento é de 0,99, sendo a temperatura inicial e o número de passos por iteração escolhidos empiricamente. Sobre a temperatura inicial, esta deve receber um valor suficientemente alto para que possibilite as diversas trocas de posições da grade horária para a geração de uma solução satisfatória, mas não tão alto a ponto de fazer o algoritmo passar boa parte do tempo de execução realizando trocas aleatórias. Este valor pode ser definido empiricamente, ou utilizando o método explicitado por [Abramson et al. \(1999\)](#), em que é calculada a temperatura em que as soluções passam por uma transição de fase.

Explicando melhor o algoritmo, o método “CriaGradeInicial” gera uma matriz com as turmas e números de aulas de cada professor alocados corretamente. Esta grade inicial provavelmente possui inúmeros conflitos, portanto são aplicados os passos de otimização. Para cada passo de otimização, são escolhidas aleatoriamente uma turma e duas linhas (posições) da grade horária. Com estas informações, é calculada a variação do número de conflitos que a permutação dos professores nas linhas escolhidas ocasionaria.

De acordo com o valor de variação calculado (delta), é determinado se a troca dos professores deve ou não ser realizada: uma troca que diminua o número de conflitos sempre é aceita, enquanto uma troca que aumenta o número de conflitos pode ser aceita probabilisticamente, de acordo com o valor da temperatura na iteração atual.

Em relação à condição de parada, durante o desenvolvimento deste primeiro incre-

mento optou-se por utilizar o esgotamento da temperatura, ou seja, o algoritmo finaliza sua execução assim que a temperatura atinge um valor próximo de zero, quando não ocorrem mais permutações de professores.

### 3.3.2 PESOS E RESTRIÇÕES

Apesar da importância da resolução de conflitos, existem diversas outras nuances durante o planejamento das grades horárias que precisam ser levadas em conta para que as grades produzidas sejam aplicáveis na prática.

Abramson (1991) sugere uma forma de permitir a otimização de múltiplas características simultaneamente utilizando: uma função de custo ponderado. Esta função foi implementada, utilizando-se um sistema de métricas, cada qual mensura quantitativamente determinada característica da grade horária, e contém um peso que define a sua importância para a grade como um todo.

A função de custo ponderado retorna um valor que representa a qualidade geral de uma grade horária, através do cálculo da média ponderada de todas as métricas de qualidade. Em outras palavras, quanto menor o custo, melhor a solução encontrada.

Adicionalmente, as métricas foram implementadas de forma que pudessem ser rígidas ou suaves. As métricas rígidas precisam ser perfeitamente atendidas para que a grade horária seja considerada viável, enquanto as métricas suaves promovem a melhoria da qualidade, mas não necessariamente precisam ser perfeitamente atendidas. Dessa forma, uma solução é considerada ótima se pontua perfeitamente nas métricas rígidas, e atinge o limite inferior das métricas suaves.

As próximas seções terão como objetivo explicar cada uma destas métricas e os desafios associados. A Subseção 3.3.2.10 entrará em mais detalhes sobre como as grades horárias passaram a ser salvas após a implementação das métricas.

#### 3.3.2.1 Agrupamento de aulas

Observando grades horárias escolares existentes, é possível notar que existe uma motivação para realizar agrupamentos, formando aulas duplas. Isso aumenta a produtividade das aulas, à medida que diminui trocas e deslocamento de professores entre as salas. Para produzir estes agrupamentos, foram adicionadas algumas métricas que fazem o otimizador penalizar:

1. Aulas separadas;
2. Aulas desagrupadas;
3. Excessos de aulas iguais para determinada turma em um dia;
4. Dias com todas aulas planejadas distintas para determinada turma;

Para contextualizar estas situações, a seguir serão apresentados alguns quadros.

Quadro 1 – Exemplo de dia com aulas separadas.

Aula	Professor	Matéria
1	Marcos	Matemática
2	Fábio	Física
3	Marcos	Matemática
4	Luciana	Português
5	Luciana	Português
6	Luciana	Português

Fonte: Autoria própria

Observando o quadro 1, é possível notar:

- Aulas separadas: 1, 2 e 3, visto que não estão em nenhum agrupamento;
- Aulas desagrupadas: 1 e 3, pois consistem em múltiplas aulas iguais, no mesmo dia, que não foram agrupadas;
- Excessos de aulas: 4, 5, 6, pois consiste em uma aula tripla, algo considerado não desejável neste trabalho.

Por fim, a situação de dias com todas aulas diferentes, que serão referidos como “Dias fragmentados” neste trabalho, pode ser observada no quadro 2.

Quadro 2 – Exemplo de dia fragmentado.

Aula	Professor	Matéria
1	Marcos	Matemática
2	Fábio	Física
3	Luciana	Português
4	Roberto	Geografia
5	Renato	História

Fonte: Autoria própria

### 3.3.2.2 Constantes

Durante o desenvolvimento, concebeu-se o conceito de “Aulas constantes”, como aulas que absolutamente devem ser alocadas em determinada posição da grade horária. Isto é útil para guiar o otimizador rumo a uma solução desejada, quando já são conhecidas algumas aulas que devem ser fixas.

Como exemplo de caso de uso, uma escola com seis aulas diárias pode ter alguns dias da semana com menos aulas, e pode ser interessante definir explicitamente quais dias devem ter a última aula da grade horária não alocada (vazia). A figura 2 mostra um exemplo de configuração de aulas constantes para determinada grade horária.

Figura 2 – Aulas constantes

Constantes						
Dia	Aula	6 Ano	1 EM	7 Ano	8 Ano	9 Ano
Segunda-feira	1	Verônica				
	2	Verônica				
	3					
	4					
	5					
	6					
Terça-feira	1	Luciana	Adriana			
	2	Luciana	Adriana			
	3					
	4					
	5					
	6					
Quarta-feira	1					
	2					
	3					
	4					
	5					
	6					
Quinta-feira	1					
	2					
	3					
	4					
	5					
	6					
Sexta-feira	1					
	2					
	3					
	4					
	5					
	6					

Fonte: Autor

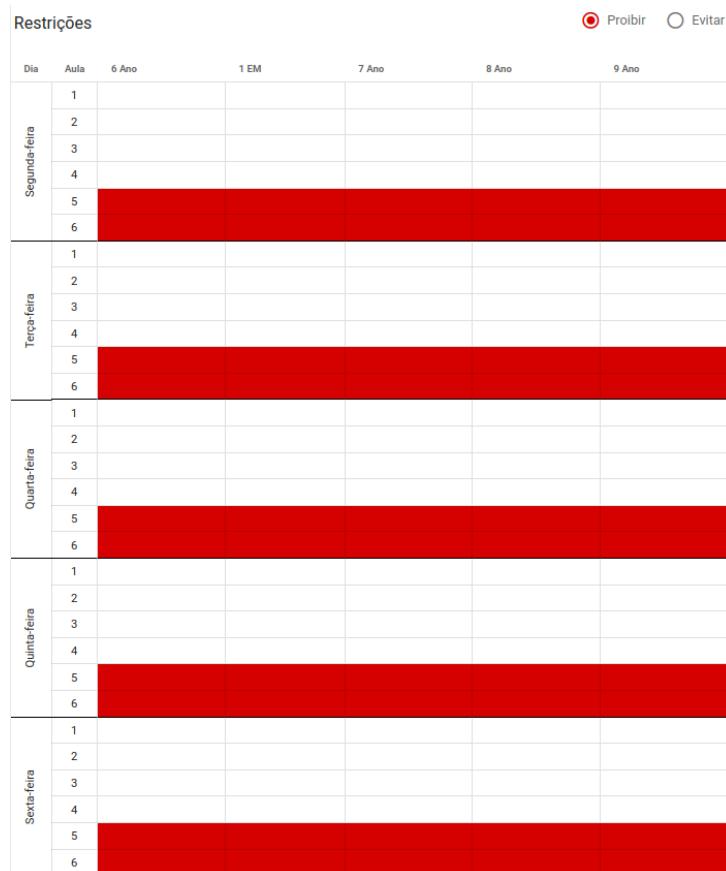
Considerando a natureza absoluta das aulas constantes, estas não são consideradas um métrica de qualidade, e não possuem um peso próprio. Em vez disso, no método “GeraGradeInicial” do algoritmo 1, o otimizador já aloca as aulas constantes nas posições desejadas, e a função “EscolheHorariosAleatoriosValidos” não seleciona posições que estejam alocadas com aulas constantes. Desta forma, um vez que as aulas constantes são posicionadas na grade horária, estas nunca são movidas durante os passos de otimização.

### 3.3.2.3 Restrições

As restrições representam o oposto das aulas constantes: posições em que determinadas aulas não devem ser alocadas. Implementaram-se no otimizador restrições suaves e rígidas, cada uma podendo também receber um peso customizado. Dessa forma, é possível configurar o otimizador para nunca alocar determinada aula em certa posição da grade, ou apenas evitar isso.

Como exemplo de uso dessa funcionalidade, a figura 3 demonstra uma configuração de restrições para determinado professor que não pode ser alocado nas duas últimas aulas de qualquer dia da grade horária.

Figura 3 – Restrições



Fonte: Autor

### 3.3.2.4 Limite de dias trabalhados

Adicionou-se esta métrica como uma forma de especificar um número máximo de dias por semana em que um professor pode ser alocado. Como exemplo de aplicação dessa

configuração, considere uma grade horária que comporta 30 horários de aulas (6 aulas por dia, 5 dias por semana, por exemplo). Se um professor deve ministrar 15 aulas nessa grade, o ideal é que suas aulas sejam concentradas em apenas três dias. Logo, configurando-se um limite de 3 dias de trabalho para esse professor, asseguramos que suas aulas serão alocadas de uma forma mais compacta na grade horária.

Esta métrica simplesmente mensura o excesso de dias trabalhados, conforme os limites configurados. Por exemplo, se determinado professor tem um limite de 2 dias trabalhados, mas teve aulas alocadas em quatro dias diferentes, a métrica considera um desvio de dois dias.

Como pode ser visto na figura 4, os limites de dias trabalhados são diretamente associados aos professores, e por isso são configurados na tela de “Estrutura da Escola” na interface, na tabela de professores.

Figura 4 – Limites de dias trabalhados por professor

Professores		
Nome	Limite de dias de trabalho	Ações
T1	2	
T2	2	
T3	2	
T4	2	
T5	2	
T6	3	
T7	2	
T8	2	

Fonte: Autor

### 3.3.2.5 Regiões

O conceito de regiões foi concebido como uma forma de proporcionar ainda mais controle ao usuário, sobre o posicionamento das aulas na grade horária. Cada região consiste em um grupo arbitrário de posições da grade horária, associado a uma regra relacionada a uma quantidade de aulas. Com as regiões, é possível determinar mínimos, máximos ou quantidades exatas de aulas que devem ser alocadas em certas posições da grade horária.

Como exemplo de uso das regiões, a figura 5 demonstra uma configuração utilizada para assegurar que em todos os dias da grade horária, o professor tenha alguma aula alocada no primeiro horário.

A região configurada na 5 pode ser interpretada da seguinte forma: a professora “Verônica” deve ter exatamente cinco aulas alocadas dentro das posições marcadas pela cor azul. Como o otimizador não permite conflitos, cada uma das cinco aulas deverá ser alocada em um dos diferentes dias, garantindo que a professora terá uma aula agendada no primeiro horário de cada um dos dias.

Figura 5 – Exemplo de região

		Região (Verônica - Exatamente 5 aulas)					
	Dia	Aula	6 Ano	1 EM	7 Ano	8 Ano	9 Ano
Segunda-feira	1						
	2						
	3						
	4						
	5						
	6						
Terça-feira	1						
	2						
	3						
	4						
	5						
	6						
Quarta-feira	1						
	2						
	3						
	4						
	5						
	6						
Quinta-feira	1						
	2						
	3						
	4						
	5						
	6						
Sexta-feira	1						
	2						
	3						
	4						
	5						
	6						

Fonte: Autor

Neste caso, a métrica associada mensura o erro das regiões, ou seja, a diferença entre a quantidade de aulas esperada de acordo com a regra de cada região e a quantidade real de aulas alocadas.

### 3.3.2.6 Grupos de Alinhamento

Os grupos de alinhamento representam uma forma de configurar o otimizador para agendar aulas para diferentes turmas, nos mesmos horários. Isto é útil para atender a restrições relacionadas ao conceito dos Itinerários Formativos do Novo Ensino Médio, conforme citado na Seção 2.2.

Como exemplo de utilização dos grupos de alinhamentos, tem-se a configuração da figura 6. Esta configuração de exemplo informa ao otimizador que 3 aulas da professora “Verônica” no “6º Ano” devem ser alocadas simultaneamente a 3 aulas da professora “Adriana” no “7º Ano”. Os efeitos desta configuração podem ser vistos na 7, com as aulas corretamente alocadas em horários simultâneos.

Implementaram-se duas métricas de qualidade relacionadas aos grupos de alinhamento, uma que mensura a quantidade de grupos formados e a quantidade de aulas “desalinhadas”, ou seja, aulas que deveriam ser agendadas no mesmo horário, mas que não foram.

No caso da figura 7, foram formados dois grupos (demarcados em vermelho), e nenhuma aula ficou desalinhada, ou seja, todas as seis aulas configuradas no grupo de alinhamento foram corretamente alocadas em horários simultâneos.

Figura 6 – Exemplo de grupo de alinhamento configurado

Grupos de Alinhamento			NOVO GRUPO		
6 Ano		7 Ano			
Professor	Aulas	Ações	Professor	Aulas	Ações
Verônica	3		Adriana	3	

Fonte: Autor

Figura 7 – Efeito de grupo de alinhamento

Dia	Aula	6 Ano	7 Ano	
Segunda-feira	1	Jack	Português	História
	2	Jack	Português	História
	3	Renata	História	Geografia
	4	Verônica	Geografia	Ciências
	5	Verônica	Geografia	Ciências
	6			
Terça-feira	1	Jack	Português	Artes
	2	Jack	Português	Artes
	3	Jéssica	Inglês	Matemática
	4	Rosa	Matemática	Of. Texto
	5	Rosa	Matemática	Beatriz
	6	Beatriz	ED. Física	
Quarta-feira	1	Renata	História	Português
	2	Renata	História	Português
	3	Rosa	Matemática	História
	4	Luciana	Of. Texto	Matemática
	5	Verônica	Geografia	Ciências
	6			
Quinta-feira	1	Adriana	Ciências	Espanhol
	2	Adriana	Ciências	Português
	3	Jack	Português	Filosofia
	4	Jéssica	Inglês	Matemática
	5	Jéssica	Filosofia	Geografia
	6		Verônica	Geografia
Sexta-feira	1	Rosa	Matemática	Inglês
	2	Rosa	Matemática	Inglês
	3	Jack	Espanhol	Matemática
	4	Adriana	Ciências	Matemática
	5	Cristiane	Artes	Português
	6	Cristiane	Artes	Português

Fonte: Autor

### 3.3.2.7 Janelas

As janelas consistem em situações em que a jornada de trabalho de determinado professor apresenta um horário sem aulas alocadas, fazendo com que o docente fique ocioso. O quadro 3 exemplifica esta situação.

Quadro 3 – Exemplo de dia com janela.

Aula	6ºAno	7ºAno	8ºAno
1	Jéssica	Rosa	Adriana
2	Jéssica	Rosa	Adriana
3	Fábio	Jéssica	Rosa
4	Adriana	Jéssica	Rosa
5	Beatriz	Adriana	Jéssica

Fonte: Autoria própria

No quadro 3, a professora “Adriana” tem uma janela na terceira aula, visto que tem aulas alocadas antes e depois (aulas 1, 2, 4 e 5). Em contrapartida, apesar de não ter nenhuma aula planejada no quinto horário, “Rosa” não tem janelas neste exemplo, pois pode encerrar sua jornada de trabalho na quarta aula.

A métrica de janelas mensura o número de horários na grade que apresentam estes horários ociosos, para cada professor.

### 3.3.2.8 Preferências

As preferências consistem em configurações que informam ao otimizador características preferíveis para a alocação das aulas de cada professor. Implementaram-se os seguintes tipos de preferência no otimizador:

1. Preferência de primeiras aulas;
2. Preferência de últimas aulas;
3. Forçar última aula;

Figura 8 – Configuração de preferências

Preferências						Verônica
Dia	6 Ano	7 Ano	8 Ano	9 Ano	1 EM	
Segunda-feira	2 primeiras aulas	2 primeiras aulas	2 primeiras aulas	2 primeiras aulas	2 primeiras aulas	
Terça-feira	Forçar última aula					
Quarta-feira						
Quinta-feira						
Sexta-feira						

Fonte: Autor

A Figura 8 representa um exemplo de configuração de preferências para determinado professor. Neste caso, a configuração informa ao otimizador que na segunda-feira, as aulas de “Verônica” devem ser alocadas desde o início do dia, não ultrapassando um total de duas aulas; e que na terça-feira, na turma do “6º Ano”, caso haja uma aula dessa professora, esta deve ser alocada na última aula.

Vale ressaltar que o diferencial da preferência “Forçar última aula” é que esta considera a possibilidade de aulas vazias, ou seja, caso o último horário do dia não tenha uma aula alocada, a preferência considera que a aula deve ser alocada na penúltima aula.

### 3.3.2.9 Mínimos e máximos

Desenvolveram-se métricas de qualidade relacionadas a quantidades de aulas ministradas por dia. Como pode ser visto na figura 9, estas métricas permitem configurar quantidades mínimas e máximas de aulas por dia para cada professor.

Figura 9 – Mínimos de aulas configuradas na interface

Professor	Tarde					Limites diárias					
	Segunda	Terça	Quarta	Quinta	Sexta	Professor	Segunda	Terça	Quarta	Quinta	Sexta
Adriana	0	0	0	0	0	Adriana	0	0	0	0	0
Beatriz	2	0	2	0	0	Beatriz	0	0	0	0	0
Cristiane	0	0	0	0	0	Cristiane	0	0	0	0	0
Fábio	0	0	0	0	0	Fábio	0	0	0	0	0
Glaucia	0	0	0	0	0	Glaucia	0	0	0	0	2
Jack	0	0	0	0	0	Jack	0	0	0	0	0
Jéssica	0	0	0	0	0	Jéssica	0	0	0	0	0
Luciana	0	0	0	0	0	Luciana	0	0	0	0	0
Luciano	0	0	0	0	0	Luciano	0	0	0	0	0
Renata	0	0	0	0	0	Renata	0	0	0	0	0
Rosa	0	0	0	0	0	Rosa	0	0	0	0	0
Verônica	0	0	0	0	0	Verônica	0	0	0	0	0

Fonte: Autor

O cálculo das métricas de qualidade relacionadas aos mínimos e máximos consiste no cálculo do erro, ou seja a quantidade de aulas alocada subtraída da quantidade de aulas esperada. Vale ressaltar que enquanto os mínimos são configuráveis por turno, os máximos são interpretados como limites diários, e consequentemente levam em conta a soma da quantidade de aulas em todos os turnos. Por exemplo, se um professor tem um limite diário de cinco aulas configurado, a soma de suas aulas naquele dia, em todos os turnos, não deverá ultrapassar cinco.

### 3.3.2.10 Armazenamento de soluções

Com a adição das métricas, o critério para considerar uma grade horária como uma solução válida ficou mais estrito, e em muitos casos tornou-se praticamente impossível obter uma grade que atenda perfeitamente todas as métricas de qualidade suaves (não obrigatórias). Tendo isto em mente, foi necessário implementar uma funcionalidade de armazenamento de grades horárias um pouco mais detalhada. O resultado disso, pode ser visto no algoritmo 2.

---

**Algoritmo 2:** Otimizador com persistência de grades horárias

---

**Input:** Lista de professores  $LP$ , lista de turmas  $LT$ , matriz de aulas por professor por turma  $MA$ , temperatura inicial  $TI$ , Taxa de resfriamento  $TR$

**Output:** Grade horária de professores otimizada

```

temperatura ← TI
grade ← CriaGradeInicial( $LP, LT, MA$ )
iteracoesSemAlteracao ← 0
solucoes ← lista vazia
while condição de parada não atingida do
    deltaTotal ← 0
    for passo = 0 até numeroPassos do
        turma ← grade.EscolheTurmaAleatoria()
        linhas ← grade.EscolheHorariosValidos(turma)
        delta ← grade.CalculaDelta(turma, linhas)
        probabilidade ←  $e^{-\delta/\text{temperatura}}$ 
        valorAceite ← Aleatorio(0, 1)
        if delta < 0 ou probabilidade ≥ valorAceite then
            grade.PermutaProfessores(turma, linha1, linha2)
            deltaTotal ← deltaTotal + delta
            if grade não existe na lista de soluções then
                insere grade na lista de soluções
                limita lista de soluções às 100 melhores grades
            end
        end
    end
    if delta = 0 then
        iteracoesSemAlteracao ← iteracoesSemAlteracao + 1
    else
        iteracoesSemAlteracao ← 0
    end
    if iteracoesSemAlteracao ≥ 15 then
        salvaGradesRelevantes()
        apaga lista de soluções
        temperatura ← TI
        iteracoesSemAlteracao ← 0
    end
    temperatura ← temperatura * TR
end

```

---

Considerando as diversas métricas de qualidade que as grades horárias passaram a ter, o método “salvaGradesRelevantes” do algoritmo 2 salva, para cada métrica escolhida, as 5 grades que tiveram a melhor pontuação em cada métrica. A princípio, optou-se por utilizar as métricas de qualidade geral (média ponderada de todas as métricas), janelas, agrupamento de aulas e número de preferências resolvidas, mas este método pode ser expandido para qualquer uma das métricas implementadas no sistema.

Devido à complexidade do problema e à natureza não determinística do algoritmo aplicando *Simulated Annealing*, é necessário utilizar o laço de repetição no presente no algoritmo 2, controlado pela condição de parada. Se o software estivesse sendo utilizado em um cenário de produção, poderia ser utilizada como condição de parada um intervalo de tempo máximo de execução, ou um limite de soluções gerado.

O principal desafio no desenvolvimento deste incremento foi manter a função “CalculaDelta” performática, já que esta é executada a cada passo de otimização. Para garantir uma performance aceitável, a função precisou ser implementada de forma que a variação de custo fosse calculada sem necessitar efetivamente a troca das aulas. Em outras palavras, a implementação simples, que seria realizar a permutação das aulas, calcular o custo e comparar com o custo atual da solução para obter a variação e depois desfazer a troca, seria ineficiente demais.

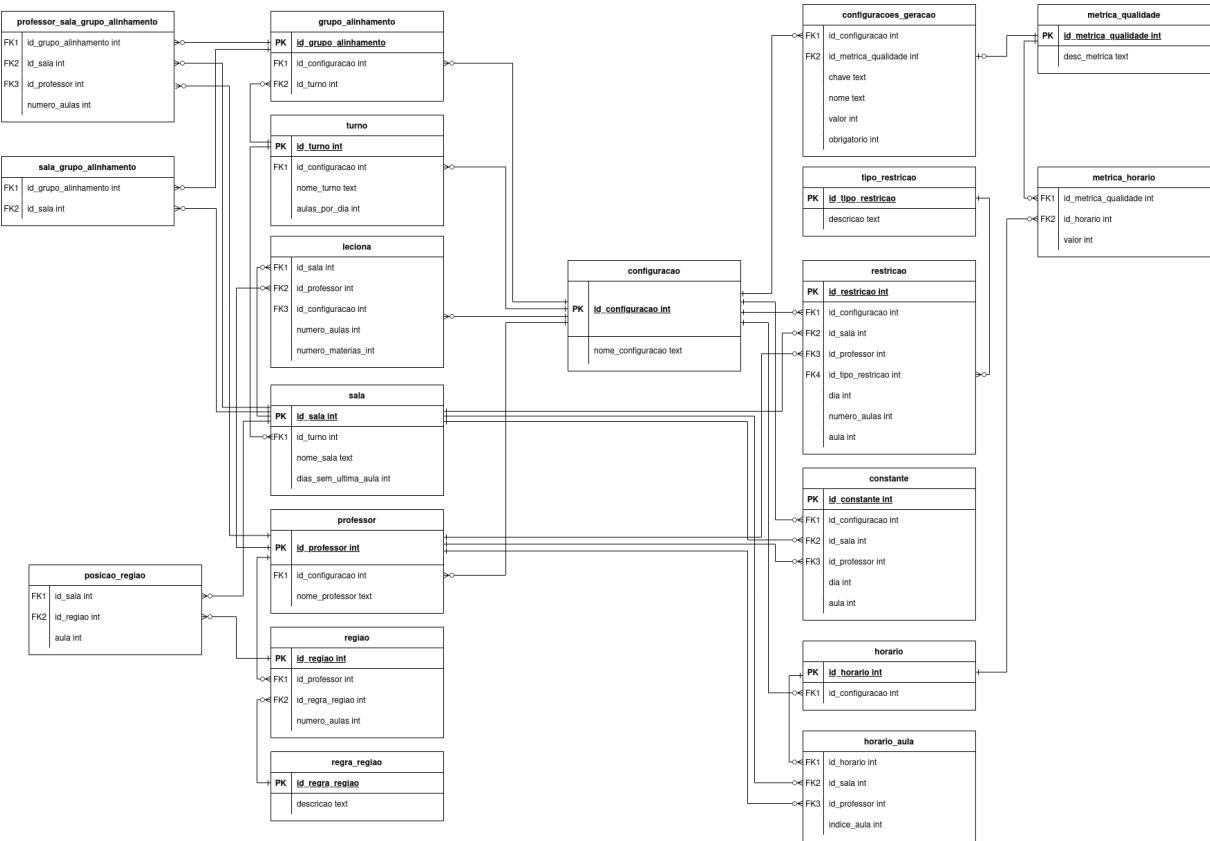
### 3.3.3 SERVIDOR E BANCO DE DADOS

A aplicação do lado do servidor é responsável por receber as requisições da interface, persistir as configurações no banco de dados e realizar a comunicação com o otimizador, a fim de produzir e armazenar as grades horárias.

Para o desenvolvimento deste componente, optou-se pelo framework *Express.js*, a ser executado na plataforma *Node.js*, devido à simplicidade de implementação que estas tecnologias proporcionam. Em relação ao banco de dados, será utilizado o sistema de gerenciamento de banco de dados *PostgresSQL*, devido à sua robustez e grande uso no mercado.

Conforme as premissas do problema sendo tratado, a modelagem do banco de dados visível na Figura 10 é centrada na entidade “Configuração”, que agrupa as configurações de determinada instituição de ensino para a geração de suas grades horárias. Cada uma dessas entidades tem turnos, turmas, professores, e as configurações de quantas aulas cada professor deve ministrar para cada turma, e as respectivas restrições.

Figura 10 – Modelo Entidade-Relacionamento



Fonte: Autor

Na [Figura 10](#), é possível notar a presença das entidades elacionadas às diversas métricas de qualidade comentadas na [Subseção 3.3.2](#), como restrições, contrantes, regiões, grupos de alinhamento, entre outras.

As figuras [11](#) e [12](#) demonstram algumas inserções e resultados de consultas utilizadas para validar a modelagem.

Figura 11 – Consultas de validação da modelagem

```

INSERT INTO configuracao (id_configuracao, nome_configuracao) VALUES(1, 'Leme');
INSERT INTO professor (id_professor, id_configuracao, nome_professor) VALUES(1, 1, 'Fabio');
INSERT INTO turno (id_turno, id_configuracao, nome_turno, aulas_por_dia) VALUES(1, 1, 'Manhã', 6);
INSERT INTO sala (id_sala, id_turno, nome_sala, dias_sem_ultima_aula) VALUES(1, 1, '6 Ano', 3);
INSERT INTO leciona (id_sala, id_professor, id_configuracao, numero_aulas, numero_materias) VALUES(1, 1, 1, 5, 1);
INSERT INTO horario (id_sala, id_professor, id_horario) VALUES(1, 1, 1);
INSERT INTO horario_aula (id_sala, id_professor, id_horario, index_aula) VALUES(1, 1, 1, 0);
INSERT INTO constante (id_constante, id_sala, id_professor, id_configuracao, dia, aula) VALUES(1, 1, 1, 0, 0, 0);
INSERT INTO tipo_restricao (id_tipo_restricao, descricao, nome_xml) VALUES(0, 'Proibir', 'normal');
INSERT INTO restricao (id_restricao, id_sala, id_professor, tipo, id_configuracao, obrigatorio) VALUES('Conflitos', NULL, 60, 'setting', 1, 1);
INSERT INTO configuracoes_geracao (chave_xml, nome, valor, tipo, id_configuracao, obrigatorio) VALUES(1, 1, 1, 0, 0, NULL);
INSERT INTO grupo_alinhamento (id_grupo_alinhamento, id_configuracao, id_turno) VALUES(1, 1, 1);
INSERT INTO sala_grupo_alinhamento (id_sala, id_grupo_alinhamento) VALUES(1, 1);
INSERT INTO professor_sala_grupo_alinhamento (id_professor, id_sala, id_grupo_alinhamento, numero_aulas) VALUES(1, 1, 1, 2);
INSERT INTO regiao (id_regiao, id_professor, num_aulas, regra) VALUES(1, 1, 1, 0);
INSERT INTO posicao_regiao (id_regiao, id_sala, aula) VALUES(1, 1, 2);

```

**Statistics 1 X**

Name	Value
Queries	16
Updated Rows	16
Execute time (ms)	41
Fetch time (ms)	0
Total time (ms)	41
Finish time	2023-05-20 15:13:53.843

Fonte: Autor

Figura 12 – Resultado da consulta de uma grade no banco de dados

DiaSemana	Aula	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Segunda	1	Renata	Rosa	Cristiane	Luciana	Adriana	Jéssica	Glaucia																	
Segunda	2	Renata	Rosa	Cristiane	Luciana	Glaucia	Jéssica	Adriana																	
Segunda	3	Beatriz	Renata	Rosa	Jéssica	Glaucia	Luciana	Adriana																	
Segunda	4	Cristiane	Renata	Rosa	Adriana	Jéssica	Glaucia	Luciana																	
Segunda	5	Cristiane	Adriana	Beatriz	Adriana	Jéssica	Glaucia	Luciana																	
Segunda	6	[NULL]	Beatriz	[NULL]	[NULL]	Luciana	Jéssica	Adriana																	
Terça	1	Rosa	Luciano	Luciana	Renata	Fabio	Adriana	Jéssica																	
Terça	2	Rosa	Adriana	Luciana	Fabio	Luciano	Glaucia	Jéssica																	
Terça	3	Luciano	Adriana	Renata	Fabio	Jéssica	Glaucia	Luciana																	
Terça	4	Luciano	Renata	Adriana	Jéssica	Fabio	Luciana	Glaucia																	
Terça	5	Adriana	Jéssica	Luciana	Beatriz	Fabio	Luciano	Glaucia																	
Terça	6	Adriana	[NULL]	[NULL]	[NULL]	Luciana	Glaucia	Luciano	Jéssica																
Quarta	1	Luciano	Jack	Rosa	Luciana	Adriana	Renata	Jéssica																	
Quarta	2	Rosa	Jack	Jéssica	Luciano	Adriana	Renata	Luciana																	
Quarta	3	Jack	Luciano	Jéssica	Fabio	Luciana	Adriana	Renata																	
Quarta	4	Jéssica	Luciano	Luciana	Fabio	Jack	Adriana	Renata																	
Quarta	5	Jéssica	Jack	Luciano	Luciana	Glaucia	Fabio	Adriana																	
Quarta	6	[NULL]	[NULL]	Luciano	Luciana	Glaucia	Jack	Adriana																	
Quinta	1	Luciana	Jack	Rosa	Renata	Jéssica	Fabio	Adriana																	
Quinta	2	Jéssica	Jack	Rosa	Renata	Adriana	Luciana	Fabio																	
Quinta	3	Jack	Rosa	Renata	Jéssica	Fabio	Adriana	Luciana																	
Quinta	4	Jack	Rosa	Renata	Jéssica	Luciana	Adriana	Fabio																	
Quinta	5	Adriana	Jéssica	Luciana	Jack	Luciano	Glaucia	Fabio																	
Quinta	6	[NULL]	[NULL]	Jack	Luciana	Luciano	Adriana	Glaucia																	
Sexta	1	Jack	Rosa	Luciana	Jéssica	Adriana	Renata	Luciano																	
Sexta	2	Renata	Jack	Jéssica	Fabio	Adriana	Luciana	Luciano																	
Sexta	3	Rosa	Jéssica	Luciano	Adriana	Renata	Luciana	Fabio																	
Sexta	4	Rosa	Luciana	Adriana	Luciano	Renata	Jéssica	Jack																	
Sexta	5	Jack	Jéssica	Adriana	Luciano	Luciana	Fabio	Glaucia																	
Sexta	6	Jack	Jéssica	[NULL]	[NULL]	Luciana	Fabio	Glaucia																	

Fonte: Autor

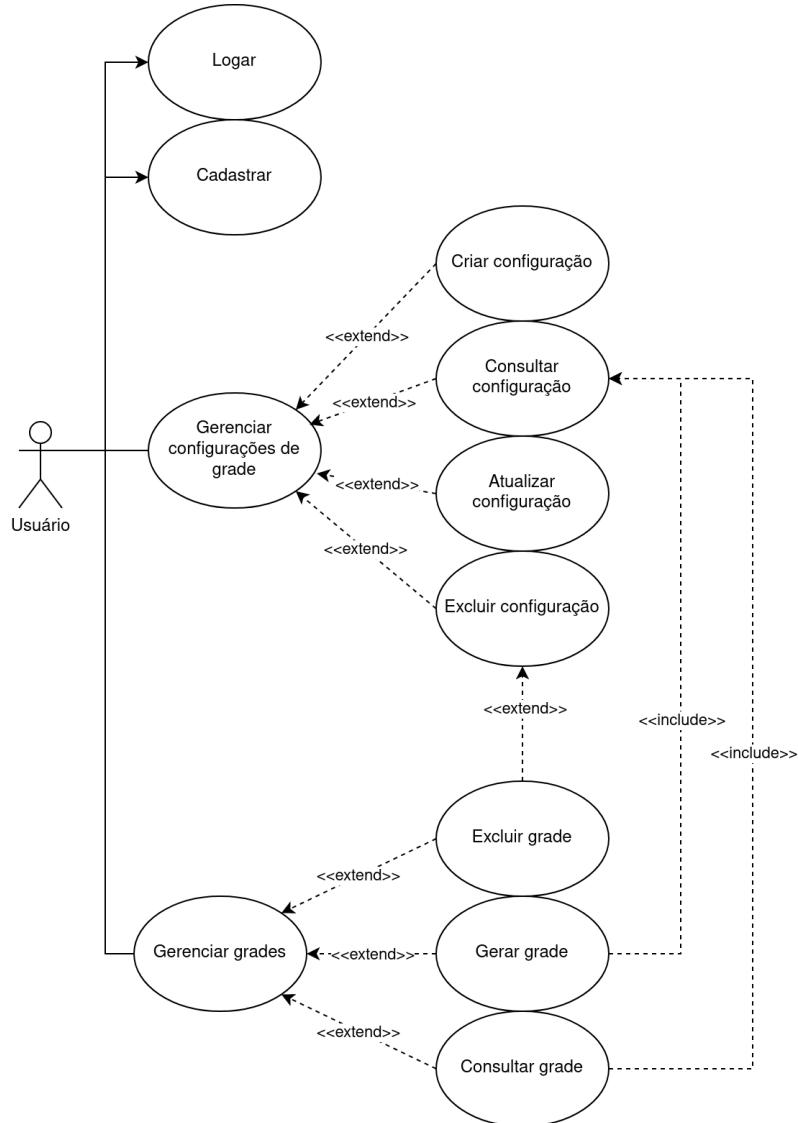
### 3.3.4 INTERFACE

A interface web é responsável pela interação do usuário final com a aplicação. Portanto, implementaram-se funcionalidades que possibilitam a configuração das restrições e características das grades horárias a serem geradas, além de mostrar ou exportar tais grades após a geração.

Para o desenvolvimento deste componente, optou-se pelo framework *Vue.js*, devido à riqueza de seu ecossistema de desenvolvimento *frontend* e familiaridade do graduando com este. Complementando este framework, utilizou-se também o *Vuetify.js*, a fim de facilitar e padronizar o design da aplicação.

A [Figura 13](#) mostra os casos de uso que a interface web é responsável por disponibilizar:

Figura 13 – Diagrama de Casos de Uso



Fonte: Autor

O sistema desenvolvido apresenta um fluxo principal composto por 7 telas, sendo delas 6 etapas de configuração e uma tela de resultados. A seguir será apresentada a função de cada uma dessas telas, com suas figuras correspondentes em seguida.

- **Figura 14:** Como comentado anteriormente, alguns dos casos de uso da aplicação envolvem o gerenciamento de configurações de grades horárias, as quais são listadas nessa tela;
- **Figura 15:** A tela de “Estrutura da Escola” é responsável por permitir que o usuário cadastre os professores da escola. Nessa tela é possível notar que a aplicação foi estruturada seguindo uma noção de etapas de configuração até a geração da grade horária final;
- **Figura 16:** Continuação da tela de estrutura da escola, mostrada na **Figura 15**. Esta parte da tela é responsável pela configuração das turmas e turnos da escola;
- **Figura 17:** Permite a configuração de número de aulas que cada professor deve ministrar em cada turma, informação fundamental para a geração das grades horárias;
- **Figura 18:** Responsável pela configuração das aulas constantes para cada professor;
- **Figura 19:** Responsável pela configuração das restrições e preferências. Nesta, o usuário pode configurar horários na grade que devem ser evitados ou proibidos para determinado docente;
- **Figura 20:** Possibilita a configuração das regiões e grupos de alinhamento;
- **Figura 21:** Permite a definição de quantidade mínimas e máximas de aulas para cada professor em cada dia da grade horária;
- **Figura 22:** Nesta tela o usuário pode requisitar a geração da grade horária utilizando as configurações realizadas nas etapas anteriores, e acessar as grades geradas anteriormente.

Figura 14 – Tela - Listagem de Configurações de Grade

Configurações de horário		<b>NOVA CONFIGURAÇÃO</b>
Nome	Ações	
Teste	⊕ ✓ └	
Leme	⊕ ✓ └	
LemeMultiTurno	⊕ ✓ └	

Fonte: Autor

Figura 15 – Tela - Estrutura da Escola - Professores

The screenshot shows a table titled 'Professores' with the following data:

Nome	Ações
Fábio	✓
Adriana	✓
Luciana	✓
Luciano	✓
Jack	✓
Glaucia	✓
Renata	✓
Beatriz	✓
Rosa	✓
Jéssica	✓
Cristiane	✓

Below this is another table titled 'Turnos' with the following data:

Nome	Aulas por dia	Ações
...	-	-

At the top of the screen, there is a navigation bar with tabs: Horário, Estrutura da Escola, Aulas/Materias, Aulas constantes, Restrições, Regras de preenchimento, Mínimos/Maximos, and Horários. There are also buttons for CONFIGURAÇÕES and HORÁRIOS.

Fonte: Autor

Figura 16 – Tela - Estrutura da Escola - Turmas e Turnos

The screenshot shows three main sections: Teachers, Turns, and Classes.

**Teachers:** A list of names with actions.

Fábio	✓
Glaucia	✓
Jack	✓
Jéssica	✓
Luciana	✓
Luciano	✓
Renata	✓
Rosa	✓
Verônica	✓

**Turns:** A list of turns with metrics and actions.

Nome	Aulas por dia	Ações
Manhã	6	✓

**Classes:** A list of classes with metrics and actions.

Nome	Dias sem última aula	Ordenação	Ações
6 Ano	3	0	✓
7 Ano	3	1	✓
8 Ano	3	2	✓
9 Ano	3	3	✓
1 EM	0	4	✓

At the bottom right, there are buttons for SALVAR and SAIR.

Fonte: Autor

Figura 17 – Tela - Aulas por professor

Professor	6 Ano	7 Ano	8 Ano	9 Ano	1 EM	2 EM	3 EM	Total
Fábio	0	0	0	5	4	4	4	17
Adriana	4	3	3	3	6	6	6	31
Luciana	1	1	6	6	5	5	5	29
Lucíeno	3	3	3	3	3	2	3	20
Jack	6	6	1	1	1	1	1	17
Glaucia	0	0	0	0	5	5	5	15
Renata	3	3	3	3	2	3	2	19
Beatriz	1	1	1	1	0	0	0	4
Rosa	5	5	5	0	0	0	0	15
Jéssica	3	5	3	5	4	4	4	28
Cristiane	2	0	2	0	0	0	0	4

Fonte: Autor

Figura 18 – Tela - Constantes

Separador	Triplé	Pares	Duplas	Dia	Aula	S1	S2	S3
				1	2	3	4	5
Separador	1							
Separador	2							
Separador	3							
Separador	4							
Separador	5							
Triplé	1							
Triplé	2							
Triplé	3							
Triplé	4							
Triplé	5							
Pares	1							
Pares	2							
Pares	3							
Pares	4							
Pares	5							
Duplas	1							
Duplas	2							
Duplas	3							
Duplas	4							
Duplas	5							

Fonte: Autor

Figura 19 – Tela - Restrições e Preferências

The screenshot shows the 'Horário' (Schedule) interface with the 'Restrições' (Restrictions) tab selected. The top navigation bar includes links for 'Estrutura da Escola', 'Aulas/Materias', 'Aulas constantes', 'Restrições', 'Regras de preenchimento', 'Mínimos/Máximos', and 'Horários'. Below the tabs, there are two main sections: 'Preferências' (Preferences) and 'Restrições' (Restrictions).

**Preferências:** A table where rows represent days of the week and columns represent grade levels (6º Ano, 7º Ano, 8º Ano, 9º Ano, 1º EM). The table contains entries like '2 primeiras aulas' for Segunda-feira (Monday) at 6º Ano.

**Restrições:** A table where rows represent days of the week and columns represent grade levels. The table includes a 'Proibir' (Prohibit) or 'Evitar' (Avoid) button. A red rectangular highlight covers the entire 'Restrições' section, indicating it is the active tab.

At the bottom right, there is a 'SALVAR' (Save) button with a left and right arrow icon.

Fonte: Autor

Figura 20 – Tela - Regiões e Grupos de Alinhamento

The screenshot shows the 'Horário' (Schedule) interface with the 'Regiões' (Regions) tab selected. The top navigation bar includes links for 'Estrutura da Escola', 'Aulas/Materias', 'Aulas constantes', 'Restrições', 'Regras de preenchimento', 'Mínimos/Máximos', and 'Horários'. Below the tabs, there are two main sections: 'Região' (Region) and 'Grupos de Alinhamento' (Alignment Groups).

**Região:** A table showing a region for 'Verônica' with a capacity of 5 classes. The table has columns for Professor, Regra, Aulas, and Ações.

**Grupos de Alinhamento:** A section showing alignment groups for '6º Ano' and '7º Ano'. Each group has a 'Professor' (Adriana or Verônica), 'Aulas' (3), and 'Ações' (empty).

At the bottom right, there are buttons for 'NOVA REGIÃO' (New Region), 'NOVO GRUPO' (New Group), 'EXCLUIR' (Delete), and a 'SALVAR' (Save) button with a left and right arrow icon.

Fonte: Autor

Figura 21 – Tela - Mínimos e Máximos

Horário						CONFIGURAÇÕES						SAIR													
Estrutura da Escola		Aulas/Máterias		Aulas constantes		Restrições		Regras de preenchimento		Mínimos/Máximos		Horários													
<b>Mínimos</b>																									
<b>Limites diários</b>																									
Professor	Segunda	Terça	Quarta	Quinta	Sexta	Professor	Segunda	Terça	Quarta	Quinta	Sexta														
Verônica	0	0	0	0	0	Verônica	0	0	0	0	0														
Adriana	0	0	0	0	0	Adriana	0	0	0	0	0														
Luciana	0	0	0	0	0	Luciana	0	0	0	0	0														
Luciano	0	0	0	0	0	Luciano	0	0	0	0	0														
Jack	0	0	0	0	0	Jack	0	0	0	0	0														
Glaucia	0	0	0	0	0	Glaucia	0	0	0	0	0														
Renata	0	0	0	0	0	Renata	0	0	0	0	0														
Beatriz	0	0	0	0	0	Beatriz	0	0	0	0	0														
Rosa	0	0	0	0	0	Rosa	0	0	0	0	0														
Jessica	0	0	0	0	0	Jessica	0	0	0	0	0														
Cristiane	0	0	0	0	0	Cristiane	0	0	0	0	0														
Fabio	0	0	0	0	0	Fabio	0	0	0	0	0														

SALVAR

Fonte: Autor

Figura 22 – Tela - Horários

Horário						CONFIGURAÇÕES						HORÁRIOS													
Estrutura da Escola		Aulas/Máterias		Aulas constantes		Restrições		Regras de preenchimento		Mínimos/Máximos		HORÁRIOS													
<b>Horário (10832)</b>																									
<b>Manhã</b>																									
Aula	6 Ano	7 Ano	8 Ano	9 Ano	1 EM	2 EM	3 EM																		
1	Rosa	Renata	Adriana	Jessica	Fabio	Glaucia	Luciana																		
2	Rosa	Renata	Adriana	Jessica	Glaucia	Fabio	Luciana																		
3	Adriana	Rosa	Renata	Luciana	Glaucia	Jessica	Fabio																		
4	Cristiane	Rosa	Renata	Fabio	Luciana	Jessica	Adriana																		
5	Cristiane	Jessica	Luciana	Beatriz	Fabio	Adriana	Glaucia																		
6	Beatriz				Fabio	Adriana	Glaucia																		
7	Renata	Jessica	Rosa	Luciana	Adriana	Luciano	Glaucia																		
8	Renata	Jessica	Rosa	Luciana	Adriana	Luciano	Glaucia																		
9	Jessica	Rosa	Luciano	Adriana	Glaucia	Luciana	Renata																		
10	Jessica	Rosa	Cristiane	Luciano	Luciana	Adriana	Renata																		
11	Beatriz	Luciana	Cristiane	Luciano	Adriana	Glaucia	Jessica																		
12	Rosa	Jack	Renata	Fabio	Luciana	Jessica	Adriana																		
13	Luciana	Jack	Rosa	Adriana	Jessica	Renata	Luciano																		
14	Jessica	Luciano	Rosa	Adriana	Renata	Luciana	Jack																		
15	Luciano	Jack	Luciana	Jessica	Renata	Adriana	Fabio																		
16	Jack	Adriana	Luciana	Jessica	Luciano	Glaucia	Fabio																		
17	Jack				Adriana	Glaucia	Luciano																		
18	Renata	Jessica	Luciana	Jack	Luciano	Fabio	Adriana																		
19	Rosa	Jessica	Luciana	Renata	Luciano	Jack	Adriana																		
20	Rosa	Jack	Luciano	Renata	Adriana	Jessica	Luciana																		
21	Jack	Luciano	Luciana	Jessica	Glaucia	Adriana	Fabio																		

Linhas por página: 10 1/10 de 16 | &lt; &lt; 1 &gt; &gt; |

Fonte: Autor

### 3.3.5 USUÁRIOS E AUTENTICAÇÃO

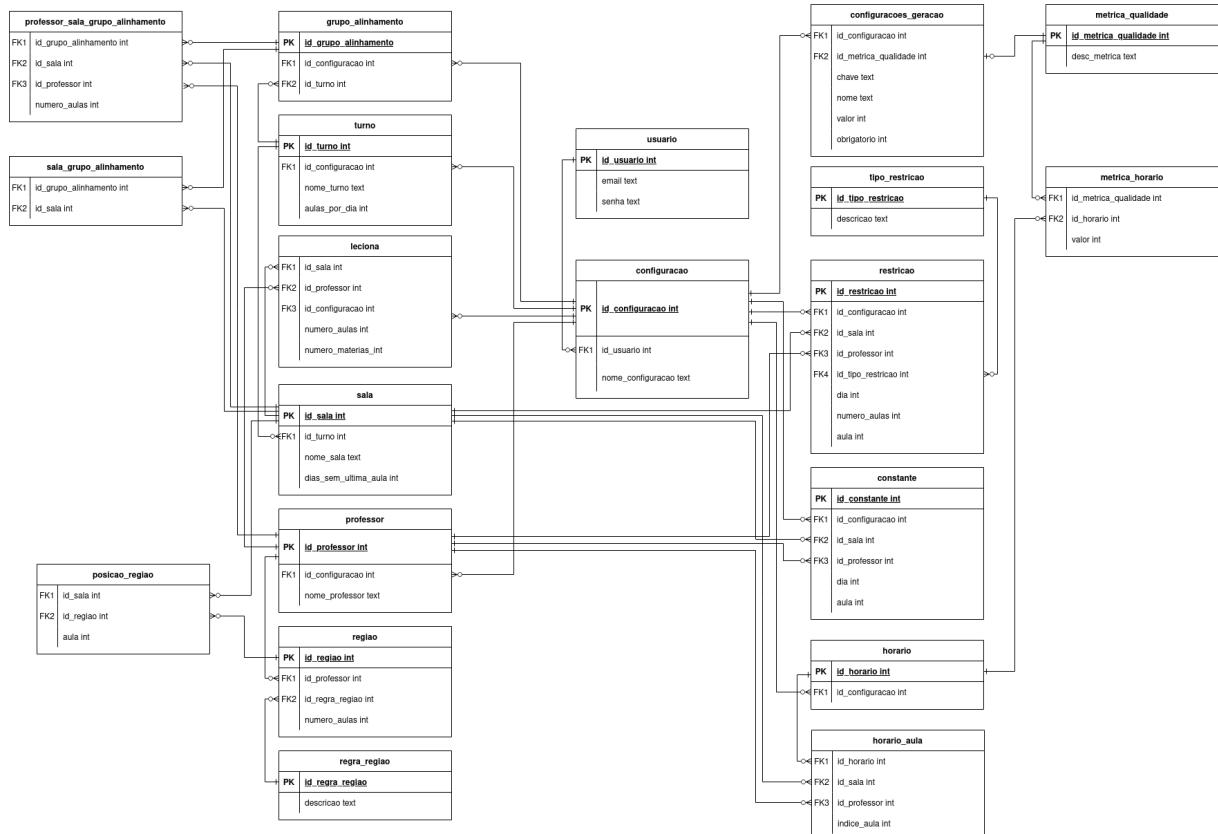
Para controlar a visibilidade de informações no sistema desenvolvido, implementou-se um sistema de usuários. A melhoria consistiu na:

1. Criação de tabela de usuários no banco de dados;
2. Associação da tabela “configuracao” com a tabela de usuários, para que fosse possível armazenar o usuário responsável por cada configuração;
3. Criação da tela de login na interface web;
4. Criação das rotas de cadastro e *login* no servidor
5. Criação do *middleware* de autenticação
6. Criação do *middleware* de validação da configuração

#### 3.3.5.1 Adaptação do banco de dados

A aplicação dos itens 1 e 2 foi realizada diretamente no banco de dados, através da criação da tabela mencionada e a chave estrangeira possibilitando a associação de cada usuário a múltiplas configurações. Após estas alterações, o diagrama entidade relacionamento do banco de dados passa a ser representado pela figura 23.

Figura 23 – Modelo Entidade-Relacionamento com adição da tabela de usuários

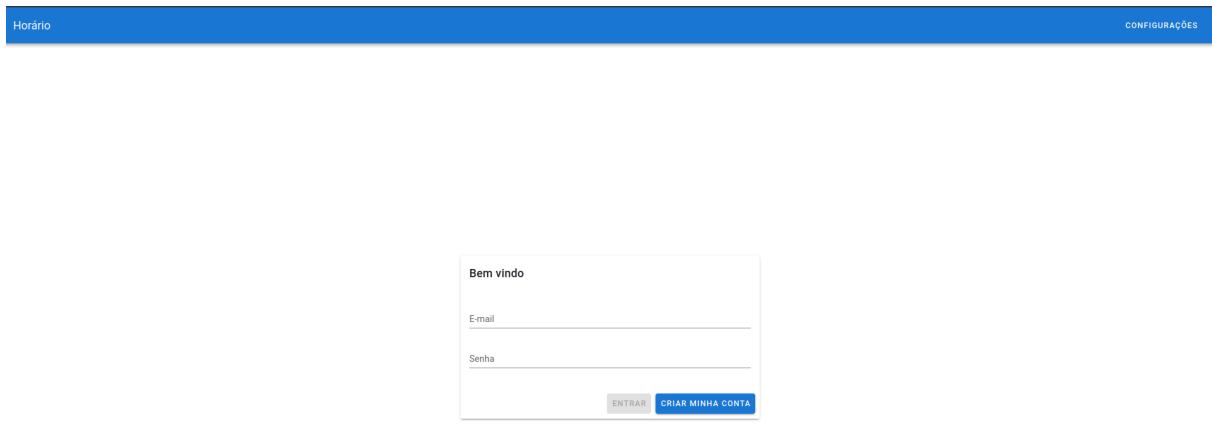


Fonte: Autor

### 3.3.5.2 Tela de login

Como pode ser visto na figura 24, desenvolveu-se uma tela simples de *login*, a qual também desempenha a função de cadastro de novos usuários.

Figura 24 – Tela de Acesso



Fonte: Autor

### 3.3.5.3 Rotas de autenticação

Para a implementação das rotas de cadastro e *login*, utilizou-se além do *framework* ExpressJS, os pacotes JWT (*Json Web Token*) e *bcrypt*. O pacote JWT é utilizado para gerar *tokens*, que são enviados para a interface web e podem ser utilizados para autenticar os usuários; já o *bcrypt* é utilizado para gerar e validars as *hashes* das senhas dos usuários, para que nunca sejam armazenadas senhas em texto pleno no banco de dados.

A função utilizada pela nova rota de cadastro pode vista na figura 25. A função "register" realiza a validação dos parâmetros, e cria um usuário no banco de dados, caso já não exista outro com o mesmo e-mail. Além disso, a função retorna um *token* JWT para a interface web, para que seja possível verificar a autenticidade das próximas requisições realizadas pelo usuário.

Figura 25 – Método de Cadastro

```

const register = async (req, res) => {
  const { email, senha } = req.body;
  if (email == null || senha == null) {
    return res.status(400).json({ message: "E-mail e senha são obrigatórios" });
  }

  const emailRegex = /^[^@\s]+@[^\s]+\.[^\s]+$/;
  if (!emailRegex.test(email)) {
    return res.status(400).json({ message: "E-mail inválido" });
  }

  if (senha.length < 6) {
    return res
      .status(400)
      .json({ message: "A senha deve conter pelo menos 6 caracteres" });
  }

  const resUsuario = await pool.query(
    "select 1 from usuario where email = $1",
    [email]
  );
  if (resUsuario.rows.length > 0) {
    return res.status(400).json({
      message: "Este e-mail já está sendo utilizado por outro usuário",
    });
  }

  const saltRounds = 10;
  const hash = await bcrypt.hash(senha, saltRounds);

  const resUsuarioInserido = await pool.query(
    "insert into usuario (email, senha) values ($1, $2) returning id_usuario",
    [email, hash]
  );
  const id_usuario = resUsuarioInserido.rows[0].id_usuario;

  const secret = process.env.JWT_SECRET;
  const token = jwt.sign({ id_usuario }, secret);
  return res
    .status(200)
    .json({ token, message: "Usuário registrado com sucesso" });
};

```

Fonte: Autor

A função de *login*, visível na figura 26 é similar, realizando validação dos parâmetros, autenticação do usuário através da comparação de senhas utilizando o pacote *bcrypt* e geração de *token* JWT. Vale citar que em ambas as rotas de autenticação, é inserido no *payload* do *token* o identificador do usuário, que posteriormente pode ser utilizado pelos *middlewares* para a realização de validações.

Figura 26 – Método de Login

```
const login = async (req, res) => {
  const { email, senha } = req.body;
  if (email == null || senha == null) {
    return res.status(400).json({ message: "E-mail e senha são obrigatórios" });
  }

  const resUsuario = await pool.query(
    "select id_usuario, senha from usuario where email = $1",
    [email]
  );
  if (resUsuario.rows.length === 0) {
    return res.status(400).json({ message: "Credenciais inválidas" });
  }

  const { senha: hash, id_usuario } = resUsuario.rows[0];
  const correctPassword = await bcrypt.compare(senha, hash);

  if (!correctPassword) {
    return res.status(400).json({ message: "Credenciais inválidas" });
  }

  const secret = process.env.JWT_SECRET;
  const token = jwt.sign({ id_usuario }, secret);

  return res
    .status(200)
    .json({ token, message: "Login realizado com sucesso" });
};
```

Fonte: Autor

### 3.3.5.4 Middlewares

Foram criadas duas funções *middleware* relacionadas aos usuários. A primeira é responsável por assegurar que apenas usuários propriamente autenticados tenham acesso aos recursos protegidos do sistema. Como pode ser visto na figura 27, essa verificação é realizada através da verificação da presença de um *token* JWT válido no header “*authorization*” da requisição.

Figura 27 – Middleware de autenticação

```

const jwt = require("jsonwebtoken");

function authenticateToken(req, res, next) {
    const authHeader = req.headers["authorization"];
    const token = authHeader && authHeader.split(" ")[1];

    if (token == null) return res.sendStatus(401);

    jwt.verify(token, process.env.JWT_SECRET, (err, data) => {
        if (err || data.id_usuario == null) return res.sendStatus(403);
        req.id_usuario = data.id_usuario;
        next();
    });
}

module.exports = authenticateToken;

```

Fonte: Autor

O outro middleware criado tem como objetivo assegurar que um usuário possa consultar apenas as configurações pelas quais seja responsável. Isso é feito utilizando o identificador do usuário, presente no *payload* do *token* JWT, conforme a figura 28. Caso o usuário não tenha um vínculo com a configuração que está tentando acessar, a requisição é bloqueada.

Figura 28 – Middleware de validação da configuração

```

const pool = require("../config/db");

async function validateConfigId(req, res, next) {
    const ids = [req.params.id, req.body.id_configuracao];
    if (ids.every((id) => id == null)) {
        return next();
    }
    const { id_usuario } = req;
    for (let id_configuracao of ids) {
        if (id_configuracao == null) {
            continue;
        }

        const result = await pool.query(
            "select 1 from configuracao where id_configuracao = $1 and id_usuario = $2",
            [id_configuracao, id_usuario]
        );
        if (result.rows.length == 0) {
            return res.sendStatus(401);
        }
    }
    return next();
}

module.exports = validateConfigId;

```

Fonte: Autor

### 3.3.6 ALOCAÇÃO DE MATÉRIAS

Durante os incrementos anteriores, o otimizador gerava grades horárias que continham apenas os nomes dos professores alocados para aula. Em outras palavras, as grades eram matrizes nas quais as linhas eram os horários disponíveis, as colunas eram as turmas e cada posição na matriz representava qual professor deveria ministrar a aula naquele horário.

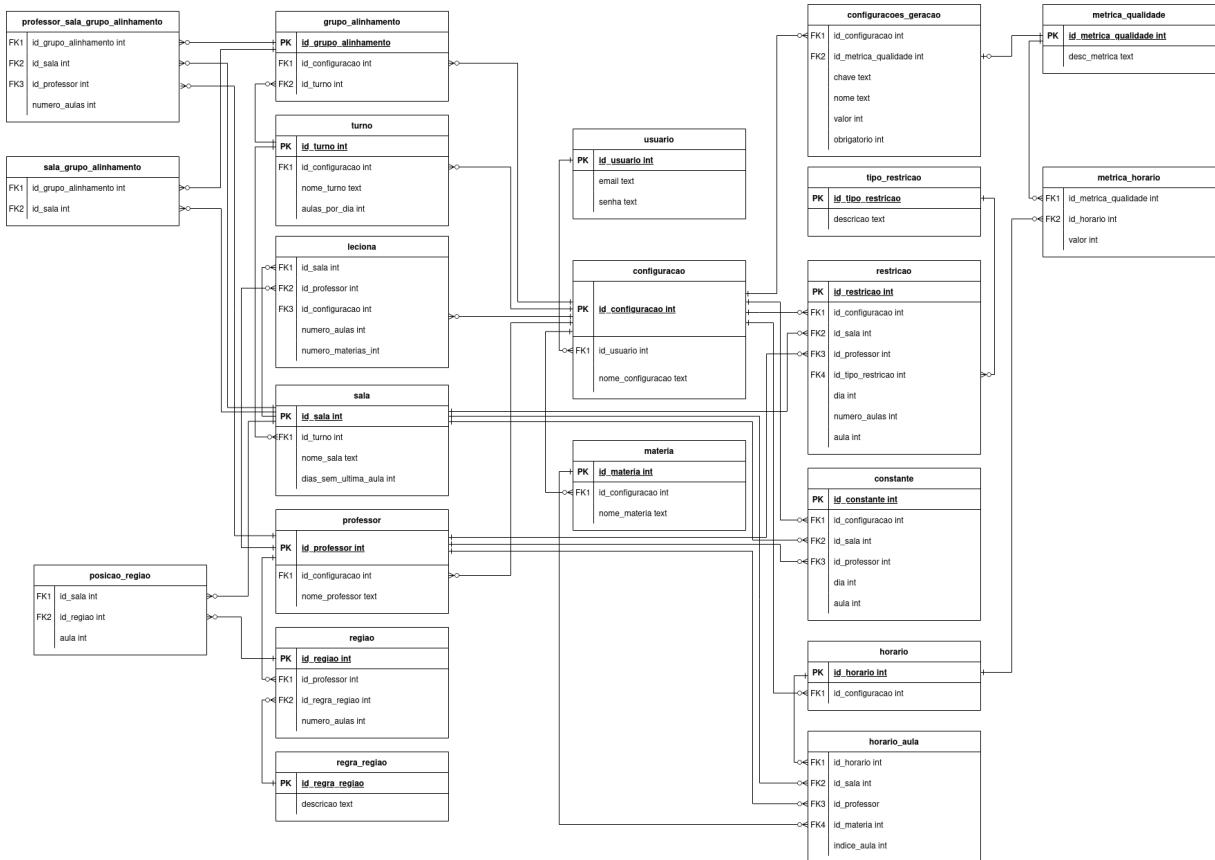
A alocação dos professores é muito importante para a resolução do problema, pois apresenta a maior parte das restrições e dificuldades relacionadas, como os conflitos, por exemplo. Entretanto, em termos de completude, decidiu-se que as grades horárias devem ter também a alocação de matérias em cada horário de aula, visto que cada professor pode ministrar aulas de mais de uma matéria. As alterações necessárias para possibilitar isso foram:

1. Alterar a modelagem do banco de dados para comportar informações relacionadas às matérias;
2. Alterar telas da interface web para que fosse possível configurar as matérias;
3. Alterar rotas do servidor para persistir as matérias;
4. Alterar código do otimizador para produzir grades horárias com matérias

### 3.3.6.1 Alteração no banco de dados

Para armazenar informações relacionadas às matérias, a modelagem do banco de dados foi alterada com a criação de uma tabela para armazenar as matérias, e a adição de uma coluna à tabela “horario” aula para que seja possível especificar matérias alocadas nas grades horárias. Com estas alterações, a modelagem do banco de dados passa a ser representada pela figura 29.

Figura 29 – Modelo Entidade-Relacionamento com Matérias



Fonte: Autor

### 3.3.6.2 Alteração de telas

Com a adição do conceito das matérias ao sistema, algumas telas da interface precisaram ser modificadas. A primeira destas, foi a tela inicial da configuração, ou seja, a tela de “Estrutura da Escola”, cuja alteração pode ser vista na figura 30 consistiu na adição de uma seção para cadastro e visualização de matérias, semelhante ao componente de cadastro de professores.

Figura 30 – Estrutura da Escola com Matérias

Materias

Name	Ações
Matemática	
Português	
Ciências	
Sociologia	
Biológia	
Física	
Química	
Geografia	
Artes	
Inglês	
Espanhol	
Relação	
História	
CF Física	
CF Teatro	
Literatura	

NOVA MATERIA

SAIR

Fonte: Autor

Além da tela de estrutura, a segunda aba da configuração (“Aulas/Matérias”) foi alterada para que fosse possível vincular matérias aos professores, e configurar a quantidade de aulas de cada matéria deve ser ministrada semanalmente, conforme a figura 31.

Figura 31 – Tela de configuração de quantidades de aulas por matéria

Aulas

Professor  
Verônica

Aulas de Verônica em Manhã

Materias	6 Ano	7 Ano	8 Ano	9 Ano	1ºM	Ações
Sociologia	0	0	0	0	1	
Geografia	3	3	3	3	2	

VINCULAR MATERIA

SAIR

Fonte: Autor

Por fim, na tela final da configuração, responsável por exibir as grades horárias geradas, foi necessário alterar o componente da grade para incluir, além dos nomes dos professores, os nomes das matérias alocadas para cada horário, como pode ser visto na figura 32.

Figura 32 – Visualização de grade horária com matérias

Horário (706)										BAIXAR		CONFIGURAÇÕES		SAIR	
1º Ano	2º Ano	3º Ano	4º Ano	5º Ano	6º Ano	7º Ano	8º Ano	9º Ano	1º EP	2º EP	3º EP	4º EP	5º EP	6º EP	7º EP
1 Jack Português	2 Rosana História	3 Verônica Geografia	4 Adriana Ciências	5 Ana Língua	Rosa Matemática	Adriana Geografia	Fábio Matemática	Gisele Matemática	1º Ano	2º Ano	3º Ano	4º Ano	5º Ano	6º Ano	7º Ano
2 Jack Português	3 Rosana História	4 Verônica Geografia	5 Adriana Ciências	Rosa Matemática	Jessica Inglês	Adriana Ciências	Fábio Matemática	Lúcia Português	Lucas Português	Adriana Ciências	Fábio Português	Verônica Geografia	Gisele Matemática	P. Vida	
3 Rosana Matemática	4 Lúcia Língua	5 Adriana Ciências	Rosa Matemática	Jessica Inglês	Adriana Ciências	Fábio Matemática	Lúcia Português	Adriana Ciências	Fábio Português	Verônica Geografia	Gisele Matemática	P. Vida			
4 Lúcia Língua	5 Adriana Ciências	Rosa Matemática	Jessica Inglês	Adriana Ciências	Fábio Matemática	Lúcia Português	Adriana Ciências	Fábio Português	Verônica Geografia	Gisele Matemática	P. Vida				
5 Adriana Ciências	Rosa Matemática	Jessica Inglês	Adriana Ciências	Fábio Matemática	Lúcia Português	Adriana Ciências	Fábio Português	Verônica Geografia	Gisele Matemática	P. Vida					
6 Ana Língua	7 Rosana História	8 Verônica Geografia	9 Adriana Ciências	10 Fábio Matemática	11 Lúcia Português	12 Adriana Ciências	13 Fábio Matemática	14 Gisele Matemática	15 P. Vida	16 Verônica Geografia	17 Gisele Matemática	18 P. Vida	19	SALVAR	3
7 Rosana História	8 Verônica Geografia	9 Adriana Ciências	10 Fábio Matemática	11 Lúcia Português	12 Adriana Ciências	13 Fábio Matemática	14 Gisele Matemática	15 P. Vida	16 Verônica Geografia	17 Gisele Matemática	18 P. Vida	19	SALVAR	3	
8 Verônica Geografia	9 Adriana Ciências	10 Fábio Matemática	11 Lúcia Português	12 Adriana Ciências	13 Fábio Matemática	14 Gisele Matemática	15 P. Vida	16 Verônica Geografia	17 Gisele Matemática	18 P. Vida	19	SALVAR	3		
9 Adriana Ciências	10 Fábio Matemática	11 Lúcia Português	12 Adriana Ciências	13 Fábio Matemática	14 Gisele Matemática	15 P. Vida	16 Verônica Geografia	17 Gisele Matemática	18 P. Vida	19	SALVAR	3			
10 Fábio Matemática	11 Lúcia Português	12 Adriana Ciências	13 Fábio Matemática	14 Gisele Matemática	15 P. Vida	16 Verônica Geografia	17 Gisele Matemática	18 P. Vida	19	SALVAR	3				
11 Lúcia Português	12 Adriana Ciências	13 Fábio Matemática	14 Gisele Matemática	15 P. Vida	16 Verônica Geografia	17 Gisele Matemática	18 P. Vida	19	SALVAR	3					
12 Adriana Ciências	13 Fábio Matemática	14 Gisele Matemática	15 P. Vida	16 Verônica Geografia	17 Gisele Matemática	18 P. Vida	19	SALVAR	3						
13 Fábio Matemática	14 Gisele Matemática	15 P. Vida	16 Verônica Geografia	17 Gisele Matemática	18 P. Vida	19	SALVAR	3							
14 Gisele Matemática	15 P. Vida	16 Verônica Geografia	17 Gisele Matemática	18 P. Vida	19	SALVAR	3								
15 P. Vida	16 Verônica Geografia	17 Gisele Matemática	18 P. Vida	19	SALVAR	3									
16 Verônica Geografia	17 Gisele Matemática	18 P. Vida	19	SALVAR	3										
17 Gisele Matemática	18 P. Vida	19	SALVAR	3											
18 P. Vida	19	SALVAR	3												
19	SALVAR	3													

Fonte: Autor

### 3.3.6.3 Alteração de métodos no servidor

A adição das matérias também envolveu algumas alterações no servidor. As rotas alteradas para acomodar a melhoria foram rotas de armazenamento e consulta da estrutura da escola, aulas e grades horárias.

Evidentemente, foi necessário criar rotas também para o gerenciamento de matérias, e as demais rotas do sistema precisaram ter suas funções de tratamento modificadas para interagir corretamente com esta nova tabela.

### 3.3.6.4 Matérias no otimizador

Após as alterações na interface, servidor e banco de dados, o sistema estava pronto para lidar com as informações relacionadas às matérias, faltando apenas a incorporação destas na geração de grades horárias por parte do otimizador.

Para realizar isso, o otimizador foi alterado para alocar também matérias na grade horária, de forma que enquanto antes a grade horária armazenava em cada posição um professor que foi alocado para aquele horário, agora passa a armazenar uma dupla de professor e matéria alocados. Durante os passos de otimização, estas duplas são permutadas, garantindo assim que cada matéria sempre corresponde a um professor compatível. Com estas alterações, o algoritmo 3 passa a representar o otimizador.

---

**Algoritmo 3:** Otimizador com alocação de matérias

---

**Input:** Lista de professores  $LP$ , lista de turmas  $LT$ , matriz de aulas e matérias por professor por turma  $MA$ , temperatura inicial  $TI$ , Taxa de resfriamento  $TR$

**Output:** Grade horária de matérias e professores otimizada

```

temperatura ← TI
grade ← CriaGradeInicial( $LP, LT, MA$ )
iteracoesSemAlteracao ← 0
solucoes ← lista vazia
while condição de parada não atingida do
    deltaTotal ← 0
    for passo = 0 até numeroPassos do
        turma ← grade.EscolheTurmaAleatoria()
        duplas ← grade.EscolheDuplasAleatoriasValidas(turma)
        delta ← grade.CalculaDelta(turma, duplas)
        probabilidade ←  $e^{-\delta/\text{temperatura}}$ 
        valorAceite ← ValorAleatorioEntre(0, 1)
        if delta < 0 ou probabilidade ≥ valorAceite then
            grade.PermutaDuplas(turma, duplas)
            deltaTotal ← deltaTotal + delta
            if grade não existe na lista de soluções then
                insere grade na lista de soluções
                limita lista de soluções às 100 melhores grades
            end
        end
    end
    if delta = 0 then
        iteracoesSemAlteracao ← iteracoesSemAlteracao + 1
    else
        iteracoesSemAlteracao ← 0
    end
    if iteracoesSemAlteracao ≥ 15 then
        salvaGradesRelevantes()
        apaga lista de soluções
        temperatura ← TI
        iteracoesSemAlteracao ← 0
    end
    temperatura ← temperatura * TR
end

```

---

### 3.3.7 VALIDAÇÃO DE CONFIGURAÇÕES

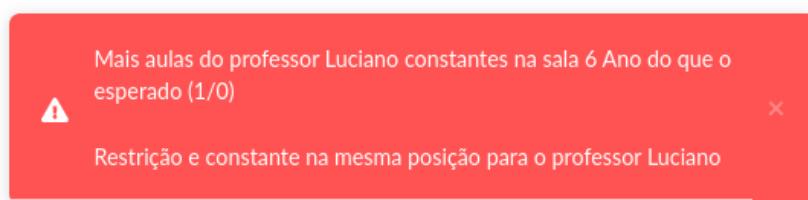
Devido à grande quantidade de configurações necessárias para parametrizar a geração de uma grade horária, erros de configurações por parte dos usuários são inevitáveis. Tendo isto em mente, implementou-se uma seção de código no otimizador, responsável pela validação das informações providenciadas pelo usuário.

Vale ressaltar que esta validação não garante que é possível gerar uma grade horária de acordo com as configurações providas, mas ela deve evitar alguns dos erros mais comuns. As validações realizadas foram:

1. Verificação de que existem turnos, turmas, professores e matérias configurados;
2. O total de aulas configurado para cada turma deve ser correto, de acordo com o número de dias da grade horária e quantidade de aulas por dia;
3. Para cada turma, nenhum professor pode ter mais aulas agendadas do que a turma acomoda, de acordo com o número de dias da grade horária e quantidade de aulas por dia;
4. Nenhum professor pode ter mais aulas constantes configuradas do que o seu total de aulas para aquela turma;
5. Não pode haver uma restrição e aula constante para determinado professor na mesma posição da grade horária;
6. Cada grupo de alinhamento deve relacionar duas turmas diferentes, e referenciar o alinhamento da mesma quantidade de aulas em ambas as turmas, sendo esta quantidade compatível com o total de aulas configurado para cada professor;
7. O número de aulas esperado para cada região deve ser compatível com o total de aulas configurado para as turmas englobadas na região.

Estas validações são executadas antes do início das otimizações das grades horárias, e caso haja algum erro de configuração, é exibida uma mensagem alertando o usuário, conforme a [Figura 33](#), e a geração da grade horária é cancelada.

Figura 33 – Mensagem de erro de validação



Fonte: Autor

### 3.3.8 EXPORTAÇÃO DE GRADES HORÁRIAS

Considerando a necessidade de exportar as grades horárias para fora do sistema, e a sua natureza tabular, implementou-se a funcionalidade de *download* das grades como planilhas Excel, no formato XLSX.

Para possibilitar a exportação neste formato, utilizou-se o pacote *Node ExcelJs*, que providencia a classe “*WorkBook*”, a qual facilita a construção de arquivos de planilhas Excel utilizando a linguagem *JavaScript*. O resultado final desta implementação pode ser visto na [Figura 34](#).

Figura 34 – Grade horária exportada para planilha

Dia	Aula	6 Ano	7 Ano	8 Ano	9 Ano	1 EM					
Segunda-feira	1	Matemática	Rosa	Português	Jack	Geografia	Verônica	Inglês	Jéssica	Matemática	Glaucia
	2	Matemática	Rosa	Português	Jack	Geografia	Verônica	Inglês	Jéssica	Matemática	Glaucia
	3	Espanhol	Jack	Matemática	Rosa	Português	Luciana	História	Renata	Filosofia	Jéssica
	4	Português	Jack	Matemática	Rosa	Português	Luciana	História	Renata	Artes	Jéssica
	5	Ciências	Adriana	ED. Física	Beatriz	Espanhol	Jack	Português	Luciana	História	Renata
	6	Ciências	Adriana					Português	Luciana	História	Renata
Terça-feira	1	Of. Texto	Luciana	Matemática	Rosa	Geografia	Verônica	Filosofia	Jéssica	P. Vida	Fabio
	2	Geografia	Verônica	Ciências	Adriana	Matemática	Rosa	Português	Luciana	Física	Fabio
	3	Geografia	Verônica	Ciências	Adriana	Matemática	Rosa	Português	Luciana	Espanhol	Jack
	4	Matemática	Rosa	Português	Jack	Of. Texto	Luciana	Geografia	Verônica	Biologia	Adriana
	5	Matemática	Rosa	Português	Jack	Artes	Cristiane	Geografia	Verônica	Biologia	Adriana
	6	ED. Física	Beatriz			Artes	Cristiane			Sociologia	Verônica
Quarta-feira	1	Filosofia	Jéssica	Geografia	Verônica	História	Renata	Ciências	Adriana	Matemática	Glaucia
	2	Artes	Cristiane	Geografia	Verônica	Português	Luciana	Artes	Jéssica	Química	Adriana
	3	Artes	Cristiane	Espanhol	Jack	Português	Luciana	Artes	Jéssica	Química	Adriana
	4	Português	Jack	Artes	Jéssica	Ciências	Adriana	Português	Luciana	Física	Fabio
	5	Português	Jack	Artes	Jéssica	Ciências	Adriana	Of. Texto	Luciana	Física	Fabio
	6					Matemática	Rosa	Matemática	Fabio	Biologia	Adriana
Quinta-feira	1	Geografia	Verônica	Ciências	Adriana	Inglês	Jéssica	Espanhol	Jack	Matemática	Glaucia
	2	Português	Jack	Matemática	Rosa	Inglês	Jéssica	Geografia	Verônica	Matemática	Glaucia
	3	Português	Jack	Inglês	Jéssica	Matemática	Rosa	História	Renata	Geografia	Verônica
	4	História	Renata	Inglês	Jéssica	Matemática	Rosa	Matemática	Fabio	Geografia	Verônica
	5	História	Renata	Geografia	Verônica	ED. Física	Beatriz	Matemática	Fabio	Português	Luciana
	6			História	Renata					Português	Luciana
Sexta-feira	1	História	Renata	Filosofia	Jéssica	Ciências	Adriana	Matemática	Fabio	Of. Texto	Luciana
	2	Inglês	Jéssica	Of. Texto	Luciana	História	Renata	Matemática	Fabio	Química	Adriana
	3	Inglês	Jéssica	Matemática	Rosa	História	Renata	Ciências	Adriana	Português	Luciana
	4	Matemática	Rosa	História	Renata	Filosofia	Jéssica	Ciências	Adriana	Literatura	Luciana
	5	Ciências	Adriana	História	Renata	Português	Luciana	ED. Física	Beatriz	Inglês	Jéssica
	6			Português	Jack					Inglês	Jéssica

Fonte: Autor

Para possibilitar o *download* das grades horárias, acrescentou-se um botão à interface. Adicionalmente, foram adicionados botões para navegar entre as diferentes grades geradas, e exibir mais informações sobre a grade selecionada. Os botões podem ser vistos, realçados em vermelho na figura [35](#):

Figura 35 – Grade horária exportada para planilha

Horário										CONFIGURAÇÕES	SAIR
	Aula	6 Ano	7 Ano	8 Ano	9 Ano	1 EM					
Segunda-Feira	1	Verônica	Geografia	Adriana	Ciências	Renata	História	Fábio	Matemática	Luciana	Português
	2	Verônica	Geografia	Adriana	Ciências	Renata	História	Fábio	Matemática	Luciana	Português
	3	Luciane	Of. Texto	Jéssica	Filosofia	Christiane	Artes	Renata	História	Adriana	Biologia
	4	Rosa	Matemática	Jéssica	Inglês	Christiane	Artes	Renata	História	Adriana	Química
	5	Rosa	Matemática	Renata	História	Jéssica	Filosofia	Jack	Espanhol	Glaucia	Matemática
	6	Jéssica	Filosofia	Rosa	Matemática					Glaucia	Matemática
Terça-Feira	1	Christiane	Artes	Renata	História	Adriana	Ciências	Fábio	Matemática	Jéssica	Inglês
	2	Christiane	Artes	Renata	História	Adriana	Ciências	Fábio	Matemática	Jéssica	Inglês
	3	Jack	Espanhol	Jéssica	Artes	Renata	História	Adriana	Ciências	Glaucia	Matemática
	4	Jack	Português	Jéssica	Inglês	Rosa	Matemática	Adriana	Ciências	Renata	História
	5	Verônica	Geografia	Luciana	Of. Texto	Rosa	Matemática	Jéssica	Artes	Renata	História
	6							Jéssica	Artes	Verônica	Sociologia
Quarta-Feira	1	Renata	História	Jéssica	Artes	Rosa	Matemática	Verônica	Geografia	Glaucia	Matemática
	2	Renata	História	Rosa	Matemática	Jéssica	Inglês	Fábio	Matemática	Glaucia	Matemática
	3	Beatriz	ED. Física	Rosa	Matemática	Jéssica	Inglês	Luciana	Português	Fábio	P. Vida
	4	Rosa	Matemática	Jack	Português	Beatriz	ED. Física	Luciana	Português	Fábio	Física
	5	Rosa	Matemática	Jack	Português	Luciana	Português	Beatriz	ED. Física	Adriana	Química
	6					Beatriz	ED. Física	Luciana	Of. Texto	Adriana	Química
Quinta-Feira	1	Jack	Português	Rosa	Matemática	Verônica	Geografia	Luciana	Português	Adriana	Biologia
	2	Jack	Português	Rosa	Matemática	Verônica	Geografia	Luciana	Of. Texto	Adriana	Biologia
	3	Adriana	Ciências	Jack	Espanhol	Rosa	Matemática	Verônica	Geografia	Luciana	Português
	4	Adriana	Ciências	Jack	Português	Rosa	Matemática	Verônica	Geografia	Luciana	Of. Texto
	5	Renata	História	Verônica	Geografia	Luciana	Português	Jéssica	Inglês	Fábio	Física
	6					Luciana	Português	Jéssica	Geografia	Fábio	Física
Sexta-Feira	1	Adriana	Ciências	Jack	Português	Verônica	Geografia	Jéssica	Inglês	Luciana	Literatura
	2	Jéssica	Inglês	Jack	Português	Adriana	Ciências	Luciana	Português	Verônica	Geografia
	3	Jéssica	Inglês	Adriana	Ciências	Jack	Espanhol	Luciana	Português	Verônica	Geografia
	4	Jack	Português	Verônica	Geografia	Luciana	Português	Adriana	Ciências	Jéssica	Artes
	5					Luciana	Português	Jéssica	Artes	Verônica	Sociologia
	6										

Fonte: Autor

Ao clicar no botão de informações, são mostradas todas as métricas de qualidade da grade horária, conforme a figura 36:

Figura 36 – Grade horária exportada para planilha

Horário (1366)										CONFIGURAÇÕES	SAIR
	Aula	6 Ano	7 Ano	8 Ano	9 Ano	1 EM					
Segunda-Feira	1	Verônica	Geografia	Adriana		Fábio	Matemática	Luciana	Português		
	2	Verônica	Geografia	Adriana		Fábio	Matemática	Luciana	Português		
	3	Luciane	Of. Texto	Jéssica		Renata	História	Adriana	Biologia		
	4	Rosa	Matemática	Jéssica		Confíteo	0	Rígida	Química		
	5	Rosa	Matemática	Renata		Restrições violadas	0	Rígida	Matemática		
	6	Jéssica	Filosofia	Rosa		Mínimos violados	0	Rígida	Geografia		
Terça-Feira	1	Christiane	Artes	Renata		Mínimos violados	0	Rígida	Literatura		
	2	Christiane	Artes	Renata		Limites diários violados	0	Rígida	Biologia		
	3	Jack	Espanhol	Jéssica		Aulas em grupos de alinhamento não alinhadas	0	Rígida	Matemática		
	4	Jack	Português	Jéssica		Erros nas regras	0	Rígida	Geografia		
	5	Verônica	Geografia	Luciana		Matrizes desagrupadas	0	Rígida	Português		
	6					Excessos de matérias iguais	0	Rígida	Artes		
Quarta-Feira	1	Renata	História	Jéssica		Excessos de aulas iguais	0	Rígida	Química		
	2	Renata	História	Rosa		Aulas desagrupadas	0	Rígida	Matemática		
	3	Beatriz	ED. Física	Rosa		Dias com todos professores diferentes	0	Rígida	Geografia		
	4	Rosa	Matemática	Jack		Restrições opcionais violadas	0	Suave	Literatura		
	5	Rosa	Matemática	Jack		Matrizes separadas	54	Suave	Biologia		
	6					Número de grupos de alinhamento formados	0	Suave	Artes		
Quinta-Feira	1	Jack	Português	Rosa		Preferências não resolvidas	0	Suave	Geografia		
	2	Jack	Português	Rosa		Horários com janela (total de todos professores)	0	Suave	Matemática		
	3	Adriana	Ciências	Jack		Aulas separadas	32	Suave	Literatura		
	4	Adriana	Ciências	Jack		Dias de professores sem aulas duplas	0	Suave	Biologia		
	5	Renata	História	Verônica					Artes		
	6										
Sexta-Feira	1	Adriana	Ciências	Jack	Português	Verônica	Geografia	Jéssica	Inglês	Luciana	Literatura
	2	Jéssica	Inglês	Jack	Português	Adriana	Ciências	Luciana	Of. Texto	Adriana	Biologia
	3	Jéssica	Inglês	Adriana	Ciências	Jack	Espanhol	Verônica	Geografia	Luciana	Português
	4	Jack	Português	Verônica	Geografia	Luciana	Português	Verônica	Geografia	Luciana	Português
	5										
	6										

Fonte: Autor

## 4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Este capítulo será responsável por evidenciar o estado final do *software*, trazendo a validação das suas funcionalidades. O capítulo está estruturado em duas seções: a seção [4.1](#) evideciará o funcionamento de ponta a ponta geral do sistema, utilizando uma instância arbitrária; enquanto a seção [4.2](#) trará os resultados de testes do sistema utilizando alguns *datasets* públicos.

### 4.1 VALIDAÇÃO INTERNA

Conforme amplamente abordado no [Capítulo 3](#), foram desenvolvivos ao longo do projeto três componentes principais: a interface web, a aplicação de servidor e o otimizador de grades. Para validar o funcionamento do sistema como um todo, realizou-se um teste de ponta a ponta, envolvendo os seguintes passos:

1. Criar uma nova conta através da interface;
2. Criar uma nova configuração de grades;
3. Configurar as quantidades de aulas, e todas as métricas de qualidade;
4. Requisitar a geração das grades horárias;
5. Verificar se as configurações foram atendidas corretamente;
6. Realizar a exportação da grade horária no formato XLSX.

Após a execução dos itens 1 e 2, foi criada uma configuração que foi utilizada para a validação do *software*. Esta configuração de teste contém dois turnos (“Manhã” e “Tarde”), cada qual com sete turmas. A tabela [1](#) contém a relação de professores, matérias e turmas do turno da manhã.

A tabela [1](#) contém o número de aulas que cada professor deve ministrar de cada matéria, em cada uma das turmas. Por exemplo, seguindo esta configuração, a professora “Adriana” deve ministrar três aulas de química e três aulas de biologia na turma do “3º EM”.

Tabela 1 – Configuração de aulas para validação.

Professor	Matéria	6ºAno	7ºAno	8ºAno	9ºAno	1ºEM	2ºEM	3ºEM
Adriana	Biologia	0	0	0	0	3	3	3
Adriana	Ciências	3	3	3	3	0	0	0
Adriana	Química	0	0	0	0	3	3	3
Beatriz	ED. Física	1	1	1	1	0	0	0
Cristiane	Artes	2	0	2	0	0	0	0
Fabio	Física	0	0	0	0	3	3	3
Fabio	Matemática	0	0	0	5	0	0	0
Fabio	P. Vida	0	0	0	0	1	1	1
Glaucia	Matemática	0	0	0	0	5	5	5
Jack	Espanhol	1	1	1	1	1	1	1
Jack	Português	5	5	0	0	0	0	0
Jéssica	Artes	0	2	0	2	1	1	1
Jéssica	Filosofia	1	1	1	1	1	1	1
Jéssica	Inglês	2	2	2	2	2	2	2
Luciana	Literatura	0	0	0	0	1	1	1
Luciana	Of. Texto	1	1	1	1	1	1	1
Luciana	Português	0	0	5	5	3	3	3
Renata	História	3	3	3	3	2	3	2
Rosa	Matemática	5	5	5	0	0	0	0
Verônica	Geografia	3	3	3	3	2	2	3
Verônica	Sociologia	0	0	0	0	1	0	0

Fonte: Autoria própria

Por questão de simplicidade, o turno da tarde contém turmas análogas ao turno da manhã, porém com o sufixo “B” para que possam ser diferenciadas. Por exemplo, se no turno da manhã consta a turma “6º Ano”, no turno da tarde constará a turma “6º Ano B”.

Para que o teste contemplasse as diversas métricas de qualidade do sistema, configuraram-se também as outras diversas características das grades horárias, que podem ser verificadas nas figuras a seguir. As figuras representam o estado final das interfaces desenvolvidas durante o projeto, e após sua apresentação, constará uma explicação mais detalhada de cada métrica configurada.

Figura 37 – Constantes configuradas na interface

Constantes		Manhã						
Dia	Aula	6 Ano	7 Ano	8 Ano	9 Ano	1 EM	2 EM	3 EM
Segunda-feira	1	Cristiane						
	2	Cristiane						
	3							
	4							
	5							
	6							
Terça-feira	1							
	2							
	3							
	4							
	5							
	6							
Quarta-feira	1							
	2							
	3							
	4							
	5							
	6							
Quinta-feira	1							
	2							
	3							
	4							
	5							
	6							
Sexta-feira	1							
	2							
	3							
	4							
	5							
	6							

Fonte: Autor

Figura 38 – Restrições e preferências configuradas na interface

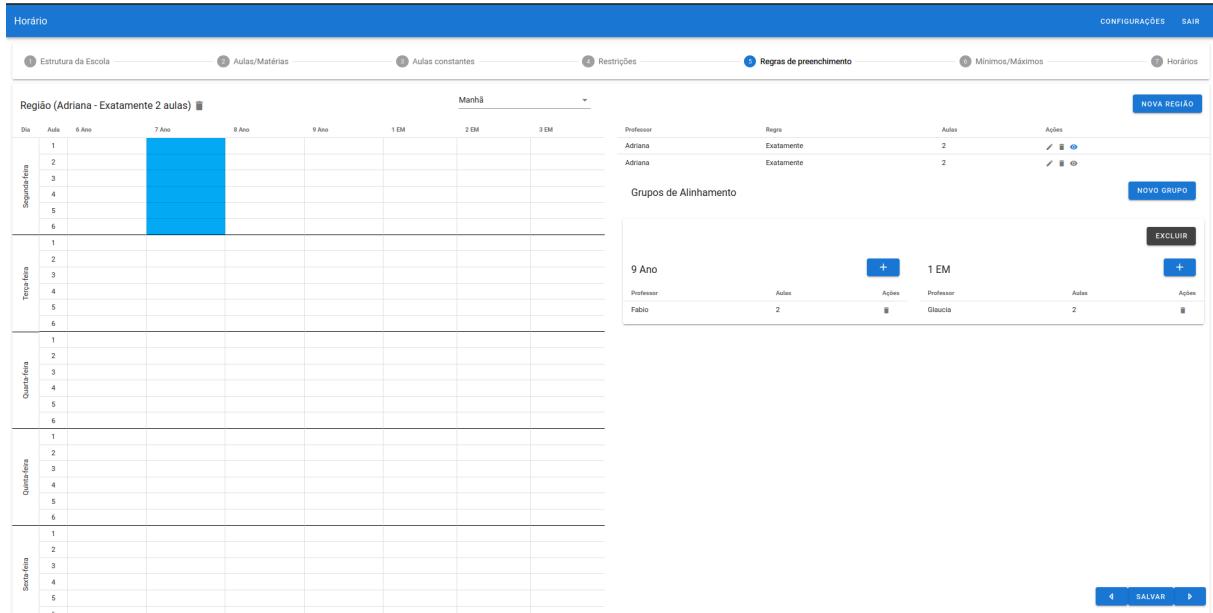
Preferências								Manhã	Beatriz
Dia	6 Ano	7 Ano	8 Ano	9 Ano	1 EM	2 EM	3 EM		
Segunda-feira	Forçar última aula								
Terça-feira	Forçar última aula								
Quarta-feira									
Quinta-feira									
Sexta-feira									

Restrições										<input checked="" type="radio"/> Proibir	<input type="radio"/> Evitar
Dia	Aula	6 Ano	7 Ano	8 Ano	9 Ano	1 EM	2 EM	3 EM			
Segunda-feira	1										
	2										
	3										
	4										
	5										
	6										
Terça-feira	1										
	2										
	3										
	4										
	5										
	6										
Quarta-feira	1										
	2										
	3										
	4										
	5										
	6										
Quinta-feira	1										
	2										
	3										
	4										
	5										
	6										
Sexta-feira	1										
	2										
	3										
	4										
	5										
	6										

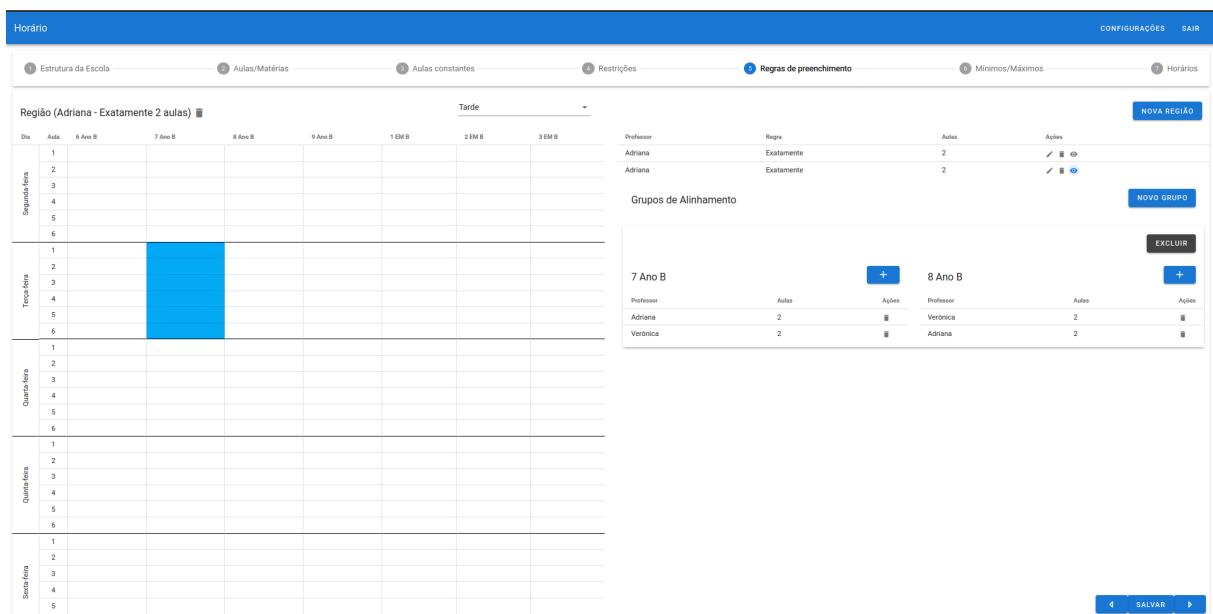
Fonte: Autor

Figura 39 – Regiões e grupos de alinhamento configuradas para o turno da “Manhã”



Fonte: Autor

Figura 40 – Regiões e grupos de alinhamento configuradas para o turno da “Tarde”



Fonte: Autor

Figura 41 – Mínimos de aulas configuradas na interface

Horário						CONFIGURAÇÕES SAIR							
Estrutura da Escola		Aulas/Matérias		Aulas constantes		Restrições		Regras de preenchimento		Mínimos/Maximos		Horários	
<b>Mínimos</b>						<b>Limites diários</b>							
Professor	Segunda	Terça	Quarta	Quinta	Sexta	Professor	Segunda	Terça	Quarta	Quinta	Sexta		
Adriana	0	0	0	0	0	Adriana	0	0	0	0	0		
Beatriz	2	1	0	2	1	0	0	0	0	0	0		
Cristiane	0	0	0	0	0	Cristiane	0	0	0	0	0		
Fábio	0	0	0	0	0	Fábio	0	0	0	0	0		
Glaucia	0	0	0	0	0	Glaucia	0	0	0	0	2		
Jack	0	0	0	0	0	Jack	0	0	0	0	0		
Jessica	0	0	0	0	0	Jessica	0	0	0	0	0		
Luciana	0	0	0	0	0	Luciana	0	0	0	0	0		
Luciano	0	0	0	0	0	Luciano	0	0	0	0	0		
Renata	0	0	0	0	0	Renata	0	0	0	0	0		
Rosa	0	0	0	0	0	Rosa	0	0	0	0	0		
Verônica	0	0	0	0	0	Verônica	0	0	0	0	0		

Fonte: Autor

- Constantes:** Conforme a figura 37, definiu-se que “Cristiane” deveria lecionar as duas primeiras aulas da segunda-feira na turma do “6º Ano”, em ambos os turnos;
- Restrições e preferências:** Na figura 38, é possível notar que no turno da manhã, “Beatriz” não deve ter aulas alocadas na quarta, quinta ou sexta-feira. Além disso, informou-se pela interface que suas aulas devem ser lecionadas obrigatoriamente como a última aula do expediente de cada turma;
- Regiões:** Utilizando o conceito das regiões, definiu-se que “Adriana” deveria lecionar exatamente duas aulas para a turma do “7º Ano” na segunda-feira, e exatamente 2 aulas para “7º Ano B” na terça-feira. Estas configurações abrangem tanto o turno da “Manhã”, quanto da “Tarde”, como pode ser visto nas figuras 39 e 40;
- Grupos de alinhamento:** Definiu-se que duas aulas do professor “Fábio” no “9º Ano” devem ser alocadas simultaneamente a duas aulas da professora “Glaucia” no “1º EM”. Além disso, duas aulas de “Adriana” no “7º Ano B” devem ser alocadas simultaneamente a duas aulas de “Verônica” no “8º Ano B”, e vice-versa. Assim como as regiões, as configurações dos grupos de alinhamento podem ser conferidas nas figuras 39 e 40;
- Mínimos e limites diários:** Como pode ser visto na figura 41, configurou-se que no turno da tarde, “Beatriz” deve ministrar no mínimo duas aulas na segunda-feira e 2 aulas na quarta-feira; além disso, “Gláucia” deve ministrar no máximo duas aulas na sexta-feira, contabilizando ambos os turnos.

Realizadas as configurações, o otimizador foi ativado, e utilizou-se como condição de parada a passagem de um intervalo de tempo de um minuto. Durante este intervalo, o otimizador produziu 65 soluções plausíveis diferentes, cada qual contendo uma grade horária para o turno da manhã e uma para o turno da tarde.

Destas soluções, a melhor encontrada pode ser vista na figura 42, cujas métricas de qualidade foram transcritas para o quadro 4. Para melhor leitura e análise, as informações de ambos os turnos da grade gerada foram exportadas para as planilhas nas figuras 43 e 44, respectivamente.

Figura 42 – Visualização de turno da manhã da melhor solução

Horário (1727) < > ↴ ⓘ												Manhã	
Dia	Aula	6 Ano	7 Ano	8 Ano	9 Ano	1 EM	2 EM	3 EM					
Segunda-feira	1	Cristiane	Artes	Jéssica	Inglês	Luciana	Português	Renata	História	Adriana	Química	Glaucia	Matemática
	2	Cristiane	Artes	Renata	História	Luciana	Of. Texto	Jéssica	Inglês	Adriana	Biologia	Glaucia	Matemática
	3	Verônica	Geografia	Jack	Espanhol	Rosa	Matemática	Adriana	Ciências	Jéssica	Filosofia	Luciana	Literatura
	4	Luciana	Of. Texto	Adriana	Ciências	Rosa	Matemática	Jack	Espanhol	Fabio	Física	Jéssica	Inglês
	5	Rosa	Matemática	Adriana	Ciências	Beatriz	ED Física	Luciana	Português	Jéssica	Inglês	Fabio	P. Vida
	6			Beatriz	ED Física			Luciana	Português	Jéssica	Inglês	Fabio	Física
Terça-feira	1	Renata	História	Verônica	Geografia	Jéssica	Inglês	Luciana	Of. Texto	Glaucia	Matemática	Adriana	Química
	2	Renata	História	Veronica	Geografia	Jéssica	Filosofia	Luciana	Português	Glaucia	Matemática	Adriana	Biologia
	3	Jéssica	Inglês	Renata	História	Verônica	Geografia	Fabio	Matemática	Adriana	Química	Glaucia	Matemática
	4	Jack	Português	Renata	História	Verônica	Geografia	Jéssica	Filosofia	Adriana	Biologia	Luciana	Literatura
	5	Jack	Português	Rosa	Matemática	Adriana	Ciências	Beatriz	ED. Física	Luciana	Português	Renata	História
	6	Beatriz	ED. Física							Luciana	Literatura	Renata	História
Quarta-feira	1	Adriana	Ciências	Luciana	Of. Texto	Jack	Espanhol	Renata	História	Verônica	Geografia	Jéssica	Inglês
	2	Adriana	Ciências	Jack	Português	Luciana	Português	Renata	História	Verônica	Geografia	Jéssica	Filosofia
	3	Renata	História	Jack	Português	Jéssica	Inglês	Verônica	Geografia	Luciana	Português	Fabio	Física
	4	Jack	Português	Jéssica	Artes	Renata	História	Fabio	Matemática	Glaucia	Matemática	Luciana	Português
	5	Jack	Português	Jéssica	Inglês	Cristiane	Artes	Fabio	Matemática	Glaucia	Matemática	Adriana	Química
	6	Rosa	Matemática	Adriana	Ciências	Cristiane	Artes			Fabio	P. Vida	Jack	Espanhol
Quinta-feira	1	Jéssica	Filosofia	Rosa	Matemática	Luciana	Português	Fabio	Matemática	Adriana	Química	Glaucia	Matemática
	2	Jéssica	Inglês	Rosa	Matemática	Luciana	Português	Fabio	Matemática	Adriana	Biologia	Glaucia	Matemática
	3	Jack	Espanhol	Jéssica	Filosofia	Rosa	Matemática	Verônica	Geografia	Glaucia	Matemática	Adriana	Biologia
	4	Rosa	Matemática	Jack	Português	Adriana	Ciências	Verônica	Geografia	Luciana	Português	Jéssica	Artes
	5	Rosa	Matemática	Jack	Português	Adriana	Ciências	Jéssica	Inglês	Luciana	Of. Texto	Glaucia	Matemática
	6					Luciana	Português	Adriana	Ciências	Verônica	Sociologia	Fabio	Física
Sexta-feira	1	Adriana	Ciências	Jack	Português	Rosa	Matemática	Jéssica	Artes	Renata	História	Luciana	Português
	2	Jack	Português	Verônica	Geografia	Rosa	Matemática	Jéssica	Artes	Renata	História	Luciana	Português
	3	Verônica	Geografia	Rosa	Matemática	Renata	História	Luciana	Português	Jack	Espanhol	Adriana	Química
	4	Verônica	Geografia	Rosa	Matemática	Renata	História	Luciana	Português	Fabio	Física	Jéssica	Filosofia
	5	Rosa	Matemática	Jéssica	Artes	Verônica	Geografia	Adriana	Ciências	Fabio	Física	Renata	História
	6					Luciana	Português	Adriana	Ciências	Verônica	Sociologia	Fabio	Física

Fonte: Autor

Quadro 4 – Métricas de qualidade da melhor solução.

Nome	Valor	Tipo
Excessos de matérias iguais	0	Rígida
Restrições violadas	0	Rígida
Limites diários violados	0	Rígida
Aulas em grupos de alinhamento não alinhadas	0	Rígida
Mínimos opcionais violados	0	Rígida
Mínimos violados	0	Rígida
Erros nas regiões	0	Rígida
Matérias desagrupadas	0	Rígida
Conflitos	0	Rígida
Aulas desagrupadas	0	Rígida
Excessos de aulas iguais	0	Rígida
Dias com todos professores diferentes	0	Rígida
Restrições opcionais violadas	0	Suave
Horários com janela (total de todos professores)	1	Suave
Número de grupos de alinhamento formados	4	Suave
Preferências não resolvidas	0	Suave
Aulas separadas	142	Suave
Dias de professores sem aulas duplas	0	Suave
Matérias separadas	208	Suave

Fonte: Autoria própria

Figura 43 – Grade exportada - Turno da Manhã

Dia	Aula	6 Ano	7 Ano	8 Ano	9 Ano	1 EM	2 EM	3 EM							
Segunda-feira	1	Artes	Cristiane	Inglês	Jéssica	Português	Luciana	História	Renata	Química	Adriana	Matemática	Glaucia	Geografia	Verônica
	2	Artes	Cristiane	História	Renata	Of. Texto	Luciana	Inglês	Jéssica	Biologia	Adriana	Matemática	Glaucia	Geografia	Verônica
	3	Geografia	Verônica	Espanhol	Jack	Matemática	Rosa	Ciências	Adriana	Filosofia	Jéssica	Literatura	Luciana	Matemática	Glaucia
	4	Of. Texto	Luciana	Ciências	Adriana	Matemática	Rosa	Espanhol	Jack	Física	Fabio	Inglês	Jéssica	Matemática	Glaucia
	5	Matemática	Rosa	Ciências	Adriana	ED. Física	Beatriz	Português	Luciana	Inglês	Jéssica	P. Vida	Fabio	Espanhol	Jack
	6			ED. Física	Beatriz			Português	Luciana	Inglês	Jéssica	Física	Fabio	Biologia	Adriana
Terça-feira	1	História	Renata	Geografia	Verônica	Inglês	Jéssica	Of. Texto	Luciana	Matemática	Glaucia	Química	Adriana	P. Vida	Fabio
	2	História	Renata	Geografia	Verônica	Filosofia	Jéssica	Português	Luciana	Matemática	Glaucia	Biologia	Adriana	Física	Fabio
	3	Inglês	Jéssica	História	Renata	Geografia	Verônica	Matemática	Fabio	Química	Adriana	Matemática	Glaucia	Literatura	Luciana
	4	Português	Jack	História	Renata	Geografia	Verônica	Filosofia	Jéssica	Biologia	Adriana	Of. Texto	Luciana	Matemática	Glaucia
	5	Português	Jack	Matemática	Rosa	Ciências	Adriana	ED. Física	Beatriz	Português	Luciana	História	Renata	Inglês	Jéssica
	6	ED. Física	Beatriz					Literatura	Luciana	História	Renata	Biología	Adriana		
Quarta-feira	1	Ciências	Adriana	Of. Texto	Luciana	Espanhol	Jack	História	Renata	Geografia	Verônica	Inglês	Jéssica	Física	Fabio
	2	Ciências	Adriana	Português	Jack	Português	Luciana	História	Renata	Geografia	Verônica	Filosofia	Jéssica	Física	Fabio
	3	História	Renata	Português	Jack	Inglês	Jéssica	Geografia	Verônica	Português	Luciana	Física	Biología	Adriana	
	4	Português	Jack	Artes	Jéssica	História	Renata	Matemática	Fabio	Matemática	Glaucia	Português	Luciana	Química	Adriana
	5	Português	Jack	Inglês	Jéssica	Artes	Cristiane	Matemática	Fabio	Matemática	Glaucia	Química	Adriana	Português	Luciana
	6	Matemática	Rosa	Ciências	Adriana	Artes	Cristiane			P. Vida	Fabio	Espanhol	Jack	Português	Luciana
Quinta-feira	1	Filosofia	Jéssica	Matemática	Rosa	Português	Luciana	Matemática	Fabio	Química	Adriana	Matemática	Glaucia	História	Renata
	2	Inglês	Jéssica	Matemática	Rosa	Português	Luciana	Matemática	Fabio	Biologia	Adriana	Matemática	Glaucia	História	Renata
	3	Espanhol	Jack	Filosofia	Jéssica	Matemática	Rosa	Geografia	Verônica	Matemática	Glaucia	Biologia	Adriana	Português	Luciana
	4	Matemática	Rosa	Português	Jack	Ciências	Adriana	Geografia	Verônica	Português	Luciana	Artes	Jéssica	Matemática	Glaucia
	5	Matemática	Rosa	Português	Jack	Ciências	Adriana	Inglês	Jéssica	Of. Texto	Luciana	Geografia	Verônica	Matemática	Glaucia
	6									Artes	Jéssica	Geografia	Verônica	Química	Adriana
Sexta-feira	1	Ciências	Adriana	Português	Jack	Matemática	Rosa	Artes	Jéssica	História	Renata	Português	Luciana	Geografia	Veronica
	2	Português	Jack	Geografia	Verônica	Matemática	Rosa	Artes	Jéssica	História	Renata	Português	Luciana	Química	Adriana
	3	Geografia	Verônica	Matemática	Rosa	História	Renata	Português	Luciana	Espanhol	Jack	Química	Adriana	Filosofia	Jéssica
	4	Geografia	Verônica	Matemática	Rosa	História	Renata	Português	Luciana	Física	Fabio	Biologia	Adriana	Inglês	Jéssica
	5	Matemática	Rosa	Artes	Jéssica	Geografia	Verônica	Ciências	Adriana	Física	Fabio	História	Renata	Of. Texto	Luciana
	6					Português	Luciana	Ciências	Adriana	Sociologia	Verônica	Física	Fabio	Artes	Jéssica

Fonte: Autor

Figura 44 – Grade exportada - Turno da Tarde

Dia	Aula	6 Ano B	7 Ano B	8 Ano B	9 Ano B	1 EM B	2 EM B	3 EM B							
Segunda-feira	1	Artes	Cristiane	Português	Jack	História	Renata	Ciências	Adriana	Português	Luciana	Filosofia	Jéssica	Matemática	Glaucia
	2	Artes	Cristiane	Português	Jack	História	Renata	Artes	Jéssica	Biologia	Adriana	Of. Texto	Luciana	Matemática	Glaucia
	3	Português	Jack	ED. Física	Beatriz	Português	Luciana	Filosofia	Jéssica	Matemática	Glaucia	Química	Adriana	História	Renata
	4	Matemática	Rosa	Filosofia	Jéssica	Português	Luciana	Espanhol	Jack	Matemática	Glaucia	Biologia	Adriana	História	Renata
	5	Inglês	Jéssica	Matemática	Rosa	ED. Física	Beatriz	Of. Texto	Luciana	Geografia	Verônica	Sociologia	Fabio	Biology	Adriana
	6	Filosofia	Jéssica							Inglês	Jéssica	Física	Fabio	Química	Adriana
Terça-feira	1	Matemática	Rosa	Of. Texto	Luciana	Inglês	Jéssica	História	Renata	Geografia	Verônica	Matemática	Glaucia	Biology	Adriana
	2	Geografia	Verônica	Matemática	Rosa	Inglês	Jéssica	História	Renata	Literatura	Luciana	Matemática	Glaucia	Química	Adriana
	3	História	Renata	Geografia	Verônica	Ciências	Adriana	Português	Luciana	Matemática	Glaucia	Inglês	Jéssica	Física	Fabio
	4	Espanhol	Jack	Geografia	Verônica	Ciências	Adriana	Português	Luciana	Matemática	Glaucia	Inglês	Jéssica	P. Vida	Fabio
	5	Português	Jack	Ciências	Adriana	Geografia	Verônica	Matemática	Fabio	Geografia	Verônica	Literatura	Luciana	Matemática	Glaucia
	6			Ciências	Adriana	Geografia	Verônica	Matemática		Artes	Jéssica	Português	Luciana	Matemática	Glaucia
Quarta-feira	1	Matemática	Rosa	História	Renata	Artes	Cristiane	Ciências	Adriana	Espanhol	Jack	Português	Luciana	Inglês	Jéssica
	2	Matemática	Rosa	História	Renata	Artes	Cristiane	Ciências	Adriana	Português	Luciana	Vida	Fabio	Artes	Jéssica
	3	Geografia	Verônica	Matemática	Rosa	História	Renata	Inglês	Jéssica	Of. Texto	Luciana	Física	Fabio	Química	Adriana
	4	Geografia	Verônica	Matemática	Rosa	Ciências	Adriana	ED. Física	Beatriz	Inglês	Jéssica	Matemática	Glaucia	Of. Texto	Luciana
	5	ED. Física	Beatriz	Artes	Jéssica	Matemática	Rosa	Português	Luciana	Química	Adriana	Geografia	Verônica	Matemática	Glaucia
	6			Ciências	Adriana	Matemática	Rosa	Português	Luciana	Matemática	Fabio	Geografia	Verônica	Filosofia	Jéssica
Quinta-feira	1	Ciências	Adriana	Português	Jack	Matemática	Rosa	Geografia	Verônica	Português	Luciana	História	Renata	Inglês	Jéssica
	2	Ciências	Adriana	Português	Jack	Matemática	Rosa	Geografia	Verônica	Filosofia	Jéssica	História	Renata	Português	Luciana
	3	História	Renata	Geografia	Verônica	Espanhol	Jack	Português	Luciana	Física	Fabio	Biologia	Adriana	Geografia	Verônica
	4	História	Renata	Espanhol	Jack	Português	Luciana	Artes	Jéssica	Física	Fabio	Química	Adriana	Geografia	Verônica
	5	Português	Jack	Inglês	Jéssica	Português	Luciana	Matemática	Fabio	Matemática	Glaucia	Química	Adriana	Geografia	Verônica
	6			Ciências	Adriana	Geografia	Verônica	Inglês	Jéssica	P. Vida	Fabio	Matemática	Glaucia	Literatura	Luciana
Sexta-feira	1	Português	Jack	Matemática	Rosa	Filosofia	Jéssica	Matemática	Fabio	História	Renata	Biologia	Adriana	Portugues	Luciana
	2	Português	Jack	Artes	Jéssica	Matemática	Rosa	Matemática	Fabio	História	Renata	Biologia	Adriana	Portugues	Luciana
	3	Matemática	Rosa	Inglês	Jéssica	Of. Texto	Luciana	História	Renata	Biolologia	Adriana	Espanhol	Jack	Física	Fabio
	4	Inglês	Jéssica	Português	Jack	Português	Luciana	Geografia	Verônica	Biologia	Adriana	História	Renata	Física	Fabio
	5	Ciências	Adriana	História	Renata	Geografia	Verônica	Inglês	Jéssica	Física	Fabio	Química	Adriana	Geografia	Verônica
	6	Of. Texto	Luciana	Ciências	Adriana					P. Vida	Fabio	Matemática	Glaucia	Geografia	Verônica

Fonte: Autor

Observando as figuras 43 e 44, constata-se que:

1. Foi alocada a quantidade correta de aulas para cada professor e matéria, nas turmas corretas, de acordo com a tabela 1;
2. As aulas foram alocadas sem causar conflitos, ou seja, em nenhum horário das grades, um professor está alocado para mais de uma turma simultaneamente;
3. Aproximadamente 64% das aulas foram agrupadas: conforme o quadro 4, apenas 142 do total de 396 aulas permaneceram separadas;
4. As aulas constantes mencionadas no item 1 foram alocadas corretamente: Cristiane foi alocada nas duas primeiras aulas da segunda-feira na turma do 6º Ano e 6º Ano B;
5. As restrições e preferências do item 2 foram atendidas: “Beatriz” não teve aulas alocadas na quarta, quinta ou sexta-feira no turno da manhã, e neste mesmo turno suas aulas ocuparam sempre os últimos horários do expediente de cada turma;
6. Em conformidade com o item 3, na segunda-feira a professora “Adriana” teve exatamente duas aulas alocadas na turma do “7º Ano”, e duas no “7º Ano B”;
7. O grupo de alinhamento da figura 39 foi respeitado, já que duas aulas do professor “Fábio” no “9º Ano” foram alocadas simultaneamente a duas aulas de “Adriana” no “1º EM”. As aulas do grupo da figura 40 também foram alocadas corretamente;
8. As quantidades mínimas e máximas de aulas do item 5 foram respeitadas: foram alocadas para “Beatriz” exatamente duas aulas na segunda e quarta-feira no período da tarde; e exatamente duas aulas para “Gláucia” na sexta-feira, somando as aulas de ambos os turnos;

## 4.2 VALIDAÇÃO COM DATASETS PÚBLICOS

Como visto ao longo deste trabalho, o problema abordado envolve diversos tipos de restrições, tornando trabalhosa a troca de informações entre pesquisadores. Para solucionar esse problema, Post et al. (2011) sugeriu o XHSTT, um formato padronizado de arquivo XML para a representação de instâncias e soluções do *High School Timetabling Problem*.

O projeto HSTT da Universidade de Twente (2019) hospeda publicamente diversas instâncias do problema no formato XHSTT. Destas, selecionaram-se três instâncias brasileiras para complementar a validação do sistema desenvolvido, utilizando dados externos.

Para a validação e comparação de soluções utilizando o formato XHSTT, existe um software conhecido como *HSEval High School Timetable Evaluator*, parte de um projeto com objetivo de analisar instâncias e soluções para o *High School Timetabling Problem* (Kingston, 2012).

Para cada uma das instâncias de validação presentes nas próximas subseções, foi utilizado o otimizador desenvolvido ao longo deste trabalho para produzir soluções, aplicando um limite de tempo de otimização de 5 minutos para cada instância. As melhores soluções produzidas foram então exportadas e validadas utilizando o HSeval, gerando relatórios de comparação das soluções com outras soluções presentes na literatura.

Nos relatórios detalhados gerados pelo HSeval, visíveis nas figuras 46, 49 e 53, as tabelas têm suas duas últimas colunas nomeadas como “Inf.” e “Obj.”. Estas representam respectivamente a inviabilidade e valor objetivo da solução. A inviabilidade consiste nas violações de tricões rígidas (obrigatórias), enquanto o valor objetivo consiste nas violações de restrições suaves (não obrigatórias).

#### 4.2.1 Instância 1

A primeira instância de teste, identificada como “BrazilInstance1”, é composta por três turmas, 8 professores, cujas aulas devem ser alocadas em uma grade horária de 5 dias por semana, com 5 aulas por dia. As quantidade de aulas por professor em cada turma podem ser conferidas na tabela 2.

Tabela 2 – Configuração de Aulas - BrazilInstance1.

Professor	Matéria	S1	S2	S3
T1	M1	3	3	3
T2	M2	5	5	0
T3	M3	3	3	3
T4	M4	3	3	3
T5	M5	0	5	5
T6	M6	4	4	4
T7	M7	5	0	5
T8	M8	2	2	2

Fonte: Dataset hospedado pela Universidade de [Twente \(2019\)](#)

Os requisitos associados à instância são:

1. Requisito 1 (obrigatório) : Não devem existir conflitos;
2. Requisito 2 (não obrigatório) : Não devem existir janelas;
3. Requisito 3 (obrigatório) : Cada professor tem um dia da semana específico em que suas aulas não podem ser agendadas;
4. Requisito 4 (não obrigatório) : Os professores T1, T2, T3, T4, T5, T7 e T8 não devem ser alocados em mais de 2 dias da semana;
5. Requisito 5 (não obrigatório) : O professor T6 não deve ser alocado em mais de 3 dias da semana;
6. Requisito 6 (não obrigatório) : Requisitos de quantidades mínimas de aulas duplas, que devido à sua extensão e não obrigatoriedade, não será explicitado.

Sobre o requisito 3, a relação dos dias da semana bloqueados para cada professor pode ser conferida na lista abaixo:

1. Segunda-feira: T5;
2. Terça-feira: T4 e T7;
3. Quarta-feira: T1 e T6;
4. Quinta-feira: T3 e T8;
5. Sexta-feira: T2.

A melhor solução produzida pelo otimizador pode ser vista na figura 45, e a correspondente validação e pontuação na figura 46.

Figura 45 – Grade exportada - Solução para a instância BrazillInstance1

Dia	Aula	S1		S2		S3	
Segunda-feira	1	M1	T1	M6	T6	M3	T3
	2	M1	T1	M6	T6	M3	T3
	3	M3	T3	M1	T1	M7	T7
	4	M7	T7	M3	T3	M1	T1
	5	M7	T7	M3	T3	M8	T8
Terça-feira	1	M6	T6	M5	T5	M3	T3
	2	M6	T6	M3	T3	M5	T5
	3	M2	T2	M6	T6	M5	T5
	4	M3	T3	M2	T2	M6	T6
	5	M3	T3	M2	T2	M6	T6
Quarta-feira	1	M2	T2	M4	T4	M5	T5
	2	M2	T2	M5	T5	M4	T4
	3	M7	T7	M5	T5	M4	T4
	4	M4	T4	M2	T2	M7	T7
	5	M4	T4	M2	T2	M7	T7
Quinta-feira	1	M4	T4	M2	T2	M7	T7
	2	M2	T2	M5	T5	M7	T7
	3	M2	T2	M5	T5	M4	T4
	4	M7	T7	M4	T4	M5	T5
	5	M7	T7	M4	T4	M5	T5
Sexta-feira	1	M8	T8	M1	T1	M6	T6
	2	M8	T8	M1	T1	M6	T6
	3	M1	T1	M6	T6	M8	T8
	4	M6	T6	M8	T8	M1	T1
	5	M6	T6	M8	T8	M1	T1

Fonte: Autoria própria

Figura 46 – Relatório produzido pelo HSEval para a solução apresentada

### Solution Group Allan\_SimulatedAnnealing

Allan - Schedule 9812 - Simulated Annealing. Contributed by Allan Wendland Kretzmann on October 2023.

#### Solution of instance BrazilInstance1\_XHSTT-v2014 (cost 0.00041)

Distribute Split Events Constraint	Constraint Id / Point	Calculation	Inf.	Obj.
At least 1 double lesson(s)	DistributeSplit_1/T8-S3	1 * Linear(1 too few in T8-S3)		1
At least 2 double lesson(s)	DistributeSplit_2/T6-S2	1 * Linear(1 too few in T6-S2)		1
<b>Total (2 points)</b>				2

Limit Idle Times Constraint	Constraint Id / Point	Calculation	Inf.	Obj.
No IDLE times for teachers	noIDLETimesT/T2	3 * Linear(1 too ? in We)		3
No IDLE times for teachers	noIDLETimesT/T3	3 * Linear(1 too ? in Tu)		3
No IDLE times for teachers	noIDLETimesT/T4	3 * Linear(1 too ? in Th)		3
No IDLE times for teachers	noIDLETimesT/T7	3 * Linear(1 too ? in Th)		3
<b>Total (4 points)</b>				12

Cluster Busy Times Constraint	Constraint Id / Point	Calculation	Inf.	Obj.
Not more than 2 days with lessons	MaxNofDaysConstraint_T_days_2/T2	9 * Linear(gr_Tu + gr_We + gr_Th - 2)		9
Not more than 2 days with lessons	MaxNofDaysConstraint_T_days_2/T5	9 * Linear(gr_Tu + gr_We + gr_Th - 2)		9
Not more than 2 days with lessons	MaxNofDaysConstraint_T_days_2/T7	9 * Linear(gr_Mo + gr_We + gr_Th - 2)		9
<b>Total (3 points)</b>				27

Summary	Inf.	Obj.
<b>Distribute Split Events Constraint (2 points)</b>		2
<b>Limit Idle Times Constraint (4 points)</b>		12
<b>Cluster Busy Times Constraint (3 points)</b>		27
<b>Grand total (9 points)</b>		41

**Lower bound:** HSEval's lower bound for this instance is 0.

Fonte: Relatório produzido no HSEval - [Kingston \(2012\)](#)

Figura 47 – Relatório HSEval comparativo das soluções para a BrazilInstance1

Test case	LectioIntegerProgramming		Allan_SimulatedAnnealing	Haroldo_Dec_2011			
Instance	RandSeed	Cost	Rank	Cost	Rank	Cost	Rank
BrazilInstance1_XHSTT-v2014	none	0.00041	1.5	0.00041	1.5	0.00042	3.0
<b>Sum of ranks</b>			1.5		1.5		3.0
<b>Number of ranks</b>			1		1		1
<b>Average rank</b>			<b>1.50</b>		<b>1.50</b>		<b>3.00</b>

Fonte: Relatório produzido no HSEval - [Kingston \(2012\)](#)

#### 4.2.2 Instância 2

A segunda instância de teste, identificada como “BrazillInstance5”, é composta por 13 turmas, 31 professores, cujas aulas devem ser alocadas em uma grade horária de 5 dias por semana, com 5 aulas por dia. As quantidade de aulas por professor em cada turma podem ser conferidas na tabela quadro 3.

Tabela 3 – Configuração de Aulas - BrazillInstance5.

Professor	Matéria	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S 10	S11	S12	S13
T1	M1	6	6	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T2	M2	0	0	0	3	3	3	3	3	3	3	3	0	0
T3	M3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0
T4	M4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3
T5	M5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
T6	M6	5	5	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T7	M7	0	0	0	4	4	4	4	4	0	0	0	0	0
T8	M8	0	0	0	1	1	1	1	1	5	5	1	4	3
T9	M9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0
T10	M10	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	2	2
T11	M11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0
T12	M12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8
T13	M13	2	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T14	M14	0	0	0	2	2	2	2	2	0	0	0	0	0
T15	M15	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	2	2	0
T16	M16	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T17	M17	3	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T18	M18	3	3	3	2	2	0	0	2	0	2	2	0	0
T19	M19	3	3	3	0	0	2	2	0	2	0	0	2	0
T20	M20	0	0	0	0	0	0	0	2	0	2	0	0	0
T21	M21	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	2	2	0
T22	M22	0	0	0	2	2	2	2	0	0	0	0	0	0
T23	M23	0	0	0	3	3	3	3	0	0	0	3	0	0
T24	M24	0	0	0	0	0	0	0	3	3	3	0	0	0
T25	M25	0	0	0	3	3	3	3	3	3	0	0	0	0
T26	M26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	2	0
T27	M27	0	0	0	3	0	0	0	0	0	3	3	0	0
T28	M28	0	0	0	0	3	3	3	3	3	0	0	3	0
T29	M29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8
T30	M30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
T31	M31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0

Fonte: Dataset hospedado pela Universidade de Twente (2019)

Os requisitos associados à instância são:

1. Requisito 1 (obrigatório) : Não devem existir conflitos;
2. Requisito 2 (não obrigatório) : Não devem existir janelas;
3. Requisito 3 (não obrigatório) : Cada professor tem um I trabalhados por semana, conforme o quadro 5;
4. Requisito 4 (não obrigatório) : Requisitos de quantidades mínimas de aulas duplas, que não serão aqui devido a sua grande quantidade.

Quadro 5 – Limite de dias trabalhados por professor - BrazInstance5.

<b>Professor</b>	<b>Limite em dias</b>
T1	4
T2	5
T3	2
T4	2
T5	1
T6	3
T7	4
T8	5
T9	2
T10	5
T11	2
T12	4
T13	2
T14	2
T15	2
T16	1
T17	2
T18	4
T19	4
T20	1
T21	2
T22	2
T23	3
T24	2
T25	4
T26	2
T27	2
T28	4
T29	4
T30	1
T31	1

Fonte: Dataset hospedado pela Universidade de Twente (2019)

A melhor solução produzida pelo otimizador pode ser vista na figura 48, e a correspondente validação e pontuação na figura 49.

Figura 48 – Grade exportada - Solução para a instância Brazillnstance5

Dia	Aula	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13													
Segunda-feira	1	M17	T17	M18	T18	M6	T6	M25	T25	M7	T7	M19	T19	M2	M28	T28	M10	T10	M26	T26	M23	T23	M8	T8	M29	T29	
	2	M18	T18	M6	T6	M17	T17	M2	T2	M7	T7	M19	T19	M23	T23	M20	T20	M10	T10	M8	T8	M26	T26	M28	T28	M29	T29
	3	M18	T18	M6	T6	M17	T17	M2	T2	M25	T25	M7	T7	M23	T23	M20	T20	M19	T19	M8	T8	M26	T26	M28	T28	M10	T10
	4	M6	T6	M17	T17	M10	T10	M7	T7	M23	T23	M2	T2	M28	T28	M18	T18	M25	T25	M20	T20	M8	T8	M26	T26	M12	T12
	5	M6	T6	M17	T17	M18	T18	M8	T8	M23	T23	M2	T2	M28	T28	M7	T7	M21	T21	M20	T20	M11	T11	M26	T26	M12	T12
Terça-feira	1	M6	T6	M1	T1	M10	T10	M23	T23	M7	T7	M25	T25	M8	T8	M24	T24	M28	T28	M27	T27	M2	T2	M31	T31	M29	T29
	2	M19	T19	M1	T1	M6	T6	M25	T25	M7	T7	M28	T28	M23	T23	M10	T10	M24	T24	M8	T8	M2	T2	M31	T31	M29	T29
	3	M1	T1	M16	T16	M6	T6	M25	T25	M2	T2	M23	T23	M7	T7	M10	T10	M19	T19	M24	T24	M27	T27	M28	T28	M8	T8
	4	M1	T1	M6	T6	M16	T16	M10	T10	M2	T2	M23	T23	M7	T7	M25	T25	M8	T8	M24	T24	M27	T27	M19	T19	M12	T12
	5	M16	T16	M6	T6	M1	T1	M27	T27	M23	T23	M7	T7	M10	T10	M25	T25	M8	T8	M2	T2	M11	T11	M19	T19	M12	T12
Quarta-feira	1	M1	T1	M18	T18	M17	T17	M23	T23	M28	T28	M10	T10	M19	T19	M7	T7	M2	T2	M27	T27	M21	T21	M3	T3	M29	T29
	2	M17	T17	M18	T18	M1	T1	M23	T23	M28	T28	M10	T10	M19	T19	M7	T7	M2	T2	M27	T27	M21	T21	M3	T3	M29	T29
	3	M17	T17	M19	T19	M1	T1	M27	T27	M18	T18	M28	T28	M7	T7	M2	T2	M8	T8	M15	T15	M23	T23	M21	T21	M10	T10
	4	M18	T13	M10	T10	M19	T19	M27	T27	M18	T18	M28	T28	M7	T7	M2	T2	M8	T8	M15	T15	M23	T23	M21	T21	M12	T12
	5	M13	T13	M17	T17	M19	T19	M7	T7	M2	T2	M23	T23	M28	T28	M8	T8	M21	T21	M10	T10	M27	T27	M15	T15	M12	T12
Quinta-feira	1	M1	T1	M10	T10	M19	T19	M7	T7	M25	T25	M22	T22	M14	T14	M18	T18	M28	T28	M8	T8	M2	T2	M3	T3	M29	T29
	2	M10	T10	M19	T19	M1	T1	M7	T7	M25	T25	M22	T22	M14	T14	M2	T2	M28	T28	M8	T8	M18	T18	M5	T5	M12	T12
	3	M10	T10	M19	T19	M1	T1	M22	T22	M28	T28	M14	T14	M25	T25	M7	T7	M8	T8	M2	T2	M18	T18	M5	T5	M29	T29
	4	M19	T19	M1	T1	M18	T18	M10	T10	M14	T14	M7	T7	M22	T22	M28	T28	M25	T25	M2	T2	M9	T9	M8	T8	M29	T29
	5	M19	T19	M1	T1	M18	T18	M2	T2	M14	T14	M7	T7	M22	T22	M28	T28	M25	T25	M10	T10	M9	T9	M8	T8	M4	T4
Sexta-feira	1	M6	T6	M1	T1	M13	T13	M14	T14	M10	T10	M25	T25	M2	T2	M24	T24	M15	T15	M18	T18	M9	T9	M8	T8	M30	T30
	2	M6	T6	M1	T1	M13	T13	M14	T14	M10	T10	M25	T25	M2	T2	M24	T24	M15	T15	M18	T18	M9	T9	M30	T30	M8	T8
	3	M1	T1	M13	T13	M6	T6	M18	T18	M22	T22	M2	T2	M25	T25	M14	T14	M24	T24	M26	T26	M15	T15	M10	T10	M8	T8
	4	M1	T1	M13	T13	M6	T6	M18	T18	M22	T22	M8	T8	M25	T25	M14	T14	M24	T24	M26	T26	M15	T15	M10	T10	M4	T4
	5	M18	T18	M6	T6	M1	T1	M22	T22	M8	T8	M14	T14	M10	T10	M25	T25	M2	T2	M24	T24	M26	T26	M15	T15	M4	T4

Fonte: Autoria própria

Figura 49 – Relatório produzido pelo HSEval para a solução apresentada

## Solution Group Allan\_SimulatedAnnealing

Allan - Schedule 12081 - Simulated Annealing. Contributed by Allan Wendland Kretzmann on October 2023.

### Solution of instance BrazilInstance5\_XHSTT-v2014 (cost 0.00031)

Distribute Split Events Constraint	Constraint Id / Point	Calculation	Inf.	Obj.
At least 1 double lesson(s)	DistributeSplit_1/T10-S2	1 * Linear(1 too few in T10-S2)		1
At least 1 double lesson(s)	DistributeSplit_1/T10-S3	1 * Linear(1 too few in T10-S3)		1
At least 1 double lesson(s)	DistributeSplit_1/T10-S4	1 * Linear(1 too few in T10-S4)		1
At least 1 double lesson(s)	DistributeSplit_1/T10-S7	1 * Linear(1 too few in T10-S7)		1
At least 1 double lesson(s)	DistributeSplit_1/T10-S10	1 * Linear(1 too few in T10-S10)		1
At least 1 double lesson(s)	DistributeSplit_1/T10-S13	1 * Linear(1 too few in T10-S13)		1
At least 1 double lesson(s)	DistributeSplit_1/T11-S11	1 * Linear(1 too few in T11-S11)		1
At least 1 double lesson(s)	DistributeSplit_1/T14-S6	1 * Linear(1 too few in T14-S6)		1
At least 1 double lesson(s)	DistributeSplit_1/T15-S12	1 * Linear(1 too few in T15-S12)		1
At least 1 double lesson(s)	DistributeSplit_1/T18-S8	1 * Linear(1 too few in T18-S8)		1
At least 1 double lesson(s)	DistributeSplit_1/T19-S9	1 * Linear(1 too few in T19-S9)		1
At least 1 double lesson(s)	DistributeSplit_1/T21-S9	1 * Linear(1 too few in T21-S9)		1
At least 1 double lesson(s)	DistributeSplit_1/T22-S4	1 * Linear(1 too few in T22-S4)		1
At least 2 double lesson(s)	DistributeSplit_2/T7-S4	1 * Linear(1 too few in T7-S4)		1
At least 2 double lesson(s)	DistributeSplit_2/T7-S6	1 * Linear(1 too few in T7-S6)		1
At least 2 double lesson(s)	DistributeSplit_2/T7-S8	1 * Linear(1 too few in T7-S8)		1
At least 2 double lesson(s)	DistributeSplit_2/T8-S12	1 * Linear(1 too few in T8-S12)		1
At least 3 double lesson(s)	DistributeSplit_3/T1-S1	1 * Linear(1 too few in T1-S1)		1
At least 3 double lesson(s)	DistributeSplit_3/T1-S3	1 * Linear(1 too few in T1-S3)		1
<b>Total</b> (19 points)				19

Limit Idle Times Constraint	Constraint Id / Point	Calculation	Inf.	Obj.
No IDLE times for teachers	noIDLETimesT/T2	3 * Linear(1 too ? in Fr)		3
No IDLE times for teachers	noIDLETimesT/T17	3 * Linear(1 too ? in We)		3
No IDLE times for teachers	noIDLETimesT/T25	3 * Linear(1 too ? in Mo)		3
No IDLE times for teachers	noIDLETimesT/T27	3 * Linear(1 too ? in Tu)		3
<b>Total</b> (4 points)				12

Summary	Inf.	Obj.
<b>Distribute Split Events Constraint</b> (19 points)		19
<b>Limit Idle Times Constraint</b> (4 points)		12
<b>Grand total</b> (23 points)		31

Fonte: Relatório produzido no HSEval - [Kingston \(2012\)](#)

Figura 50 – Relatório HSeval comparativo das soluções para a BrazilInstance5

Test case	ArtonDorneles_fixopt_2015-09-10	ArtonDorneles_October_2013	LectioIntegerProgramming	Allan_SimulatedAnnealing	VAGO2012	Haroldo_Dec_2011					
Instance	RandSeed	Cost	Rank	Cost	Rank	Cost	Rank	Cost	Rank	Cost	Rank
BrazilInstance5_XHSTT-v2014	none	0.00019	1.0	0.00020	2.0	0.00026	3.0	0.00031	4.0	0.00043	5.0
Sum of ranks			1.0		2.0		3.0		4.0		5.0
Number of ranks			1		1		1		1		1
Average rank			1.00		2.00		3.00		4.00		5.00

Fonte: Relatório produzido no HSEval - [Kingston \(2012\)](#)

#### 4.2.3 Instância 3

A terceira instância de teste, identificada como “BrazillInstance7”, é composta por 20 turmas, 33 professores, cujas aulas devem ser alocadas em uma grade horária de 5 dias por semana, com 5 aulas por dia. As quantidade de aulas por professor em cada turma podem ser conferidas nas tabelas 4 e 5.

Tabela 4 – Configuração de Aulas - BrazillInstance7.

Professor	Matéria	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10
T1	M1	3	3	3	3	0	0	0	0	0	0
T2	M2	0	0	0	0	0	0	3	3	3	4
T3	M3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T4	M4	0	0	0	0	3	3	0	0	0	0
T5	M5	4	4	4	4	0	0	0	0	0	0
T6	M6	0	0	0	0	4	4	4	4	0	1
T7	M7	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4
T8	M8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T9	M9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T10	M10	3	3	3	3	3	0	0	0	0	0
T11	M11	0	0	0	0	0	3	3	3	3	3
T12	M12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T13	M13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T14	M14	3	3	3	0	0	0	0	0	0	3
T15	M15	0	0	0	3	3	3	0	0	0	0
T16	M16	0	0	0	0	0	0	3	3	3	0
T17	M17	3	3	3	0	0	0	0	0	0	2
T18	M18	0	0	0	3	3	3	0	0	0	0
T19	M19	0	0	0	0	0	0	3	3	3	0
T20	M20	2	2	2	2	2	2	2	0	0	0
T21	M21	0	0	0	0	0	0	0	2	2	2
T22	M22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T23	M23	2	2	2	0	0	0	0	0	0	2
T24	M24	0	0	0	2	2	2	0	0	0	0
T25	M25	0	0	0	0	0	0	2	2	2	0
T26	M26	2	0	0	2	0	0	2	0	0	2
T27	M27	0	2	0	0	2	0	0	2	0	0
T28	M28	0	0	2	0	0	2	0	0	2	0
T29	M29	2	0	0	2	0	0	2	0	0	2
T30	M30	0	2	0	0	2	0	0	2	0	0
T31	M31	0	0	2	0	0	2	0	0	2	0
T32	M32	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
T33	M33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fonte: Dataset hospedado pela Universidade de [Twente \(2019\)](#)

Tabela 5 – Configuração de Aulas - BrazillInstance7.

Professor	Matéria	S11	S12	S13	S14	S15	S16	S17	S18	S19	S20
T1	M1	0	0	0	0	0	4	4	0	0	0
T2	M2	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T3	M3	0	4	4	4	4	0	0	0	0	0
T4	M4	0	0	0	0	0	0	0	4	4	4
T5	M5	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
T6	M6	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
T7	M7	4	4	1	0	0	0	0	0	0	0
T8	M8	1	0	4	4	4	4	0	0	0	0
T9	M9	0	0	0	0	1	0	4	4	4	4
T10	M10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T11	M11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T12	M12	3	3	3	3	3	0	0	0	0	0
T13	M13	0	0	0	0	0	3	3	3	3	3
T14	M14	0	0	3	0	0	2	2	0	0	0
T15	M15	3	0	0	3	0	0	0	2	2	0
T16	M16	0	3	0	0	3	0	0	0	0	2
T17	M17	0	0	2	0	0	2	2	0	0	0
T18	M18	2	0	0	2	0	0	0	2	2	0
T19	M19	0	2	0	0	2	0	0	0	0	2
T20	M20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T21	M21	2	2	2	2	0	0	0	0	0	0
T22	M22	0	0	0	0	2	2	2	2	2	2
T23	M23	2	2	0	0	0	0	0	0	2	0
T24	M24	0	0	2	2	2	0	0	0	0	2
T25	M25	0	0	0	0	0	2	2	2	0	0
T26	M26	0	0	2	0	0	2	0	0	2	0
T27	M27	2	0	0	2	0	0	2	0	0	2
T28	M28	0	2	0	0	2	0	0	2	0	0
T29	M29	0	0	2	0	0	2	0	0	2	0
T30	M30	2	0	0	2	0	0	2	0	0	0
T31	M31	0	2	0	0	2	0	0	2	0	2
T32	M32	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1
T33	M33	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1

Fonte: Dataset hospedado pela Universidade de [Twente \(2019\)](#)

Os requisitos associados à instância são:

1. Requisito 1 (obrigatório) : Não devem existir conflitos;
2. Requisito 2 (não obrigatório) : Não devem existir janelas;
3. Requisito 3 (não obrigatório) : Cada professor tem um limite de dias trabalhados por semana, conforme o quadro 6;
4. Requisito 4 (não obrigatório) : Requisitos de quantidades mínimas de aulas duplas, que não serão aqui devido a sua grande quantidade.

Quadro 6 – Limite de dias trabalhados por professor - Brazillnstance7.

Professor	Limite em dias
T1	4
T2	4
T3	4
T4	4
T5	4
T6	4
T7	4
T8	4
T9	4
T10	3
T11	3
T12	3
T13	3
T14	4
T15	4
T16	4
T17	4
T18	4
T19	3
T20	3
T21	3
T22	3
T23	3
T24	3
T25	3
T26	3
T27	3
T28	3
T29	3
T30	3
T31	3
T32	3
T33	1

Fonte: Dataset hospedado pela Universidade de Twente (2019)

A melhor solução produzida pelo otimizador pode ser vista nas figuras 51 e 52, e a correspondente validação e pontuação na figura 49.

Vale ressaltar que todas as turmas da instância pertencem ao mesmo turno, ou seja, apesar de as turmas terem sido separadas em duas figuras para melhor legibilidade, ainda poderiam ocorrer conflitos entre as turmas S1 e S20, por exemplo. Outra consideração importante é que para melhor legibilidade, na figura 53 omitiu-se a parte do relatório relacionada às quantidades mínimas de aulas duplas, considerando que a solução gerada tem 48 violações dessa regra. Contudo, estas violações ainda são consideradas no cálculo, como pode ser na primeira linha da tabela “Summary” na mesma figura.

Figura 51 – Solução para a instância Brazillnstance7 - Turmas S1 a S10

Dia	Aula	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10
Segunda-feira	1	M5 T5	M14 T14	M20 T20	M18 T18	M6 T6	M15 T15	M25 T25	M11 T11	M2 T2	M7 T7
	2	M1 T1	M23 T23	M14 T14	M5 T5	M20 T20	M18 T18	M11 T11	M16 T16	M2 T2	M7 T7
	3	M1 T1	M23 T23	M14 T14	M5 T5	M20 T20	M18 T18	M11 T11	M6 T6	M19 T19	M2 T2
	4	M14 T14	M1 T1	M5 T5	M20 T20	M18 T18	M11 T11	M6 T6	M19 T19	M7 T7	M23 T23
	5	M14 T14	M5 T5	M1 T1	M20 T20	M18 T18	M11 T11	M6 T6	M19 T19	M7 T7	M23 T23
Terça-feira	1	M10 T10	M1 T1	M17 T17	M5 T5	M30 T30	M15 T15	M2 T2	M16 T16	M7 T7	M11 T11
	2	M10 T10	M5 T5	M17 T17	M32 T32	M30 T30	M15 T15	M29 T29	M16 T16	M11 T11	M2 T2
	3	M32 T32	M17 T17	M5 T5	M10 T10	M15 T15	M4 T4	M29 T29	M11 T11	M2 T2	M7 T7
	4	M5 T5	M10 T10	M31 T31	M29 T29	M15 T15	M18 T18	M32 T32	M11 T11	M21 T21	M17 T17
	5	M5 T5	M30 T30	M31 T31	M1 T1	M10 T10	M11 T11	M16 T16	M32 T32	M21 T21	M29 T29
Quarta-feira	1	M20 T20	M1 T1	M10 T10	M26 T26	M15 T15	M28 T28	M16 T16	M25 T25	M31 T31	M7 T7
	2	M20 T20	M17 T17	M32 T32	M10 T10	M6 T6	M28 T28	M16 T16	M25 T25	M31 T31	M14 T14
	3	M1 T1	M17 T17	M20 T20	M10 T10	M18 T18	M31 T31	M2 T2	M30 T30	M16 T16	M6 T6
	4	M17 T17	M10 T10	M28 T28	M15 T15	M4 T4	M31 T31	M2 T2	M6 T6	M32 T32	M26 T26
	5	M17 T17	M10 T10	M28 T28	M15 T15	M4 T4	M6 T6	M20 T20	M2 T2	M25 T25	M26 T26
Quinta-feira	1	M26 T26	M32 T32	M5 T5	M24 T24	M10 T10	M6 T6	M20 T20	M2 T2	M25 T25	M14 T14
	2	M26 T26	M20 T20	M5 T5	M24 T24	M10 T10	M6 T6	M25 T25	M2 T2	M16 T16	M14 T14
	3	M29 T29	M20 T20	M10 T10	M26 T26	M24 T24	M32 T32	M19 T19	M6 T6	M16 T16	M2 T2
	4	M29 T29	M27 T27	M10 T10	M15 T15	M32 T32	M20 T20	M26 T26	M6 T6	M19 T19	M2 T2
	5	M10 T10	M27 T27	M17 T17	M5 T5	M4 T4	M20 T20	M26 T26	M21 T21	M19 T19	M29 T29
Sexta-feira	1	M23 T23	M30 T30	M14 T14	M29 T29	M6 T6	M24 T24	M19 T19	M21 T21	M11 T11	M17 T17
	2	M23 T23	M14 T14	M1 T1	M18 T18	M6 T6	M24 T24	M19 T19	M27 T27	M11 T11	M21 T21
	3	M5 T5	M14 T14	M1 T1	M18 T18	M24 T24	M6 T6	M11 T11	M27 T27	M7 T7	M21 T21
	4	M14 T14	M5 T5	M23 T23	M1 T1	M27 T27	M4 T4	M6 T6	M30 T30	M28 T28	M11 T11
	5	M17 T17	M5 T5	M23 T23	M1 T1	M27 T27	M4 T4	M6 T6	M19 T19	M28 T28	M11 T11

Fonte: Autoria própria

Figura 52 – Solução para a instância Brazillnstance7 - Turmas S11 a S20

Dia	Aula	S11	S12	S13	S14	S15	S16	S17	S18	S19	S20				
Segunda-feira	1	M27 T27	M3 T3	M26 T26	M12 T12	M31 T31	M1 T1	M9 T9	M22 T22	M23 T23	M19 T19				
	2	M12 T12	M3 T3	M26 T26	M15 T15	M31 T31	T31	M25 T25	M27 T27	M22 T22	M9 T9	M19 T19			
	3	M7 T7	M12 T12	M3 T3	M15 T15	M16 T16	T16	M25 T25	M27 T27	M9 T9	M26 T26	M31 T31			
	4	M21 T21	M31 T31	M12 T12	M27 T27	M3 T3	M26 T26	T26	M25 T25	M15 T15	M22 T22	M16 T16			
	5	M21 T21	M31 T31	M12 T12	M27 T27	M3 T3	M26 T26	T26	M25 T25	M15 T15	M22 T22	M16 T16			
Terça-feira	1	M8 T8	M28 T28	M21 T21	M18 T18	M12 T12	M13 T13	T13	M32 T32	M9 T9	M4 T4	M31 T31			
	2	M7 T7	M28 T28	M21 T21	M18 T18	M12 T12	M1	T1	M13 T13	M31 T31	M4 T4	M22 T22			
	3	M18 T18	M21 T21	M12 T12	M30 T30	M8 T8	M1	T1	M13 T13	M31 T31	M9 T9	M22 T22			
	4	M2 T2	M7 T7	M8 T8	M12 T12	M28 T28	T28	M22 T22	M1 T1	M4 T4	M9 T9	M13 T13			
	5	M2 T2	M7 T7	M8 T8	M12 T12	M28 T28	T28	M22 T22	M9 T9	M4 T4	M15 T15	M13 T13			
Quarta-feira	1	M2 T2	M3 T3	M17 T17	M8 T8	M24 T24	T24	M14 T14	T14	M30 T30	M9 T9	M4 T4	M32 T32		
	2	M2 T2	M7 T7	M3 T3	M8 T8	M24 T24	T24	M1 T1	M30 T30	M9 T9	M15 T15	M4 T4			
	3	M15 T15	M7 T7	M3 T3	M24 T24	T24	M8 T8	T8	M32 T32	M9 T9	M25 T25	M26 T26	M4 T4		
	4	M7 T7	T16	M14 T14	M24 T24	T24	M3 T3	M8 T8	M1 T1	M25 T25	T25	M18 T18	M9 T9		
	5	M7 T7	T16	M14 T14	M30 T30	M3 T3	M8 T8	T8	M1 T1	M32 T32	T32	M18 T18	M9 T9		
Quinta-feira	1	M27 T27	M16 T16	M29 T29	M15 T15	M19 T19	M8 T8	M13 T13	T13	M4 T4	M9 T9	M33 T33			
	2	M15 T15	M23 T23	M29 T29	M8 T8	M19 T19	M33 T33	T33	M9 T9	M4 T4	M13 T13	M27 T27			
	3	M15 T15	M23 T23	M8 T8	M5 T5	M9 T9	M17 T17	T17	M14 T14	T14	M33 T33	T13			
	4	M23 T23	M21 T21	M24 T24	M3 T3	M16 T16	T16	M17 T17	T17	M14 T14	T13	M33 T33	M9 T9		
	5	M23 T23	M6 T6	M24 T24	M3 T3	M16 T16	T16	M14 T14	T14	M33 T33	T13	M32 T32	M9 T9		
Sexta-feira	1	M18 T18	M12 T12	M7 T7	M3 T3	M22 T22	T22	M8 T8	M1 T1	M28 T28	T28	M13 T13	M27 T27		
	2	M30 T30	M12 T12	M8 T8	M3 T3	M22 T22	T22	M29 T29	M17 T17	M28 T28	T28	M4 T4	M13 T13		
	3	M30 T30	M19 T19	M3 T3	M8 T8	M12 T12	M29 T29	T29	M17 T17	T17	M13 T13	T13	M23 T23	M4 T4	
	4	M12 T12	M19 T19	M17 T17	M21 T21	M21 T21	M8 T8	M13 T13	T13	M22 T22	T22	M18 T18	T18	M29 T29	M24 T24
	5	M12 T12	M3 T3	M14 T14	M21 T21	T21	M8 T8	T8	M13 T13	T13	M22 T22	T22	M18 T18	T18	M29 T29

Fonte: Autoria própria

Figura 53 – Relatório produzido pelo HSEval para a solução apresentada

<b>Solution Group Allan_SimulatedAnnealing</b>					
Allan - Schedule 14107 - Simulated Annealing. Contributed by Allan Wendland Kretzmann on October 2023.					
<b>Solution of instance BrazilInstance7_XHSTT-v2014 (cost 0.00121)</b>					
<b>Limit Idle Times Constraint</b>	<b>Constraint Id / Point</b>	<b>Calculation</b>	<b>Inf.</b>	<b>Obj.</b>	
No IDLE times for teachers	noIDLETimesT/T3	3 * Linear(1 too ? in Fr)		3	
No IDLE times for teachers	noIDLETimesT/T4	3 * Linear(1 too ? in Th)		3	
No IDLE times for teachers	noIDLETimesT/T5	3 * Linear(1 too ? in Th)		3	
No IDLE times for teachers	noIDLETimesT/T6	3 * Linear(1 too ? in Mo)		3	
No IDLE times for teachers	noIDLETimesT/T7	3 * Linear(1 too ? in Fr)		3	
No IDLE times for teachers	noIDLETimesT/T8	3 * Linear(1 too ? in Tu)		3	
No IDLE times for teachers	noIDLETimesT/T9	3 * Linear(1 too ? in Tu)		3	
No IDLE times for teachers	noIDLETimesT/T14	3 * Linear(1 too ? in We)		3	
No IDLE times for teachers	noIDLETimesT/T16	3 * Linear(2 too ? in Tu)		6	
No IDLE times for teachers	noIDLETimesT/T20	3 * Linear(1 too ? in We)		3	
No IDLE times for teachers	noIDLETimesT/T22	3 * Linear(2 too ? in Mo, Fr)		6	
No IDLE times for teachers	noIDLETimesT/T26	3 * Linear(1 too ? in We)		3	
No IDLE times for teachers	noIDLETimesT/T27	3 * Linear(1 too ? in Th)		3	
No IDLE times for teachers	noIDLETimesT/T28	3 * Linear(3 too ? in Tu, We, Fr)		9	
No IDLE times for teachers	noIDLETimesT/T30	3 * Linear(2 too ? in Tu, We)		6	
No IDLE times for teachers	noIDLETimesT/T32	3 * Linear(1 too ? in Th)		3	
<b>Total (16 points)</b>				<b>63</b>	
<b>Cluster Busy Times Constraint</b>	<b>Constraint Id / Point</b>	<b>Calculation</b>	<b>Inf.</b>	<b>Obj.</b>	
Compact timetable for teacher 21	Compact 21/T21	9 * Linear(gr_Mo + gr_Tu + gr_Th + gr_Fr - 3)		9	
<b>Total (1 point)</b>				<b>9</b>	
<b>Summary</b>	<b>Inf.</b>	<b>Obj.</b>			
<b>Distribute Split Events Constraint (48 points)</b>		<b>49</b>			
<b>Limit Idle Times Constraint (16 points)</b>		<b>63</b>			
<b>Cluster Busy Times Constraint (1 point)</b>		<b>9</b>			
<b>Grand total (65 points)</b>		<b>121</b>			

Fonte: Relatório produzido no HSEval - [Kingston \(2012\)](#)

Figura 54 – Relatório HSeval comparativo das soluções para a BrazilInstance7

Test case	ArtonDorneles_fixopt_2015-10-11	Demirovic, Musliu - LNS MaxSAT	ArtonDorneles_October_2013	LectioIntegerProgramming	Allan_SimulatedAnnealing	VAGO2012	Haroldo Dec_2011						
Instance	RandSeed	Cost	Rank	Cost	Rank	Cost	Rank	Cost	Rank	Cost	Rank	Cost	Rank
BrazilInstance7_XHSTT-v2014	none	0.00053	1.0	0.00057	2.0	0.00067	3.0	0.00084	4.0	0.00121	5.0	0.00122	6.0
Sum of ranks			1.0		2.0		3.0		4.0		5.0		6.0
Number of ranks			1		1		1		1		1		1
Average rank			1.00		2.00		3.00		4.00		5.00		6.00
													7.00

Fonte: Relatório produzido no HSEval - [Kingston \(2012\)](#)

## 5 CONCLUSÃO

O presente trabalho abordou o *High School Timetabling Problem*, e a demanda associada por um software de otimização de grades horárias. Verificou-se durante a revisão de literatura a dificuldade que a tarefa de planejamento de grades horárias representa, e que grande parte das instituições de ensino do país ainda realiza essa tarefa manualmente.

Tal software imaginado foi desenvolvido, aplicando a meta-heurística de *Simulated Annealing*, estudada durante a revisão de literatura. Com essa meta-heurística, foi possível expandir a solução proposta por Abramson (1991), incorporando diversas métricas de qualidade adicionais, como janelas, restrições, aulas constantes, preferências, agrupamentos, entre outras.

No capítulo 4, foi averiguado o funcionamento do *software* utilizando uma instância arbitrária do problema, e três instâncias disponíveis publicamente. Os relatórios gerados pelo software HSeval mostram que nas instâncias testadas, o otimizador desenvolvido atende totalmente os requisitos obrigatórios, e atende satisfatoriamente os requisitos não obrigatórios, quando comparado com as outras soluções.

Considerando o grau de configuração atingido para as grades horárias, a performance do otimizador e atendimento às métricas de qualidade nas instâncias utilizadas para validação, conclui-se que o *software* desenvolvido atingiu os objetivos propostos neste trabalho.

Quanto às limitações do projeto desenvolvido, temos:

1. A inexistência do conceito de salas, ou seja, o sistema assume que cada turma sempre recebe suas aulas na mesma sala, o que não reflete a realidade de grandes instituições de ensino;
2. O fato de que não foram criadas configurações relacionadas a matérias: conceitos como restrições e aulas constantes são vinculados diretamente aos professores;
3. Devido à natureza não determinística do *Simulated Annealing*, é impossível determinar de antemão se a configuração desejada pelo usuário é plausível, e é difícil estabelecer uma forma razoável de reportar o progresso de otimização para o usuário.

Em relação a sugestões de trabalhos futuros, sugere-se como atividade de interesse uma melhor integração com o formato XHSTT. Este formato de representação das instâncias e soluções é muito abrangente, logo devemos reconhecer o potencial para sistemas que conseguirem utilizá-lo e possibilitarem uma configuração visual intuitiva a seus usuários.

## Referências

- ABRAMSON, D. Constructing school timetables using simulated annealing: Sequential and parallel algorithms. **Management Science**, v. 37, n. 1, p. 98–113, 1991. Disponível em: <<https://EconPapers.repec.org/RePEc:inm:ormnsc:v:37:y:1991:i:1:p:98-113>>. Citado 5 vezes nas páginas 1, 3, 6, 8 e 63.
- ABRAMSON, D. et al. Simulated annealing cooling schedules for the school timetabling problem. **Asia Pacific Journal of Operational Research**, Citeseer, v. 16, p. 1–22, 1999. Citado na página 7.
- BARDADYM, V. A. Computer-aided school and university timetabling: The new wave. In: BURKE, E.; ROSS, P. (Ed.). **Practice and Theory of Automated Timetabling**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1996. p. 22–45. ISBN 978-3-540-70682-3. Citado na página 1.
- BRASIL. Lei nº 13.415, de 16 de fevereiro de 2017. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 2017. ISSN 1677-7042. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2015-2018/2017/lei/l13415.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2017/lei/l13415.htm)>. Citado na página 3.
- COOPER, T. B.; KINGSTON, J. H. The complexity of timetable construction problems. In: **International Conference on the Practice and Theory of Automated Timetabling**. [S.I.: s.n.], 1995. Citado na página 3.
- FONSECA, G. H.; SANTOS, H. G.; CARRANO, E. G. Integrating matheuristics and metaheuristics for timetabling. **Computers And Operations Research**, v. 74, p. 108–117, 2016. ISSN 0305-0548. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305054816300879>>. Citado na página 1.
- KINGSTON, J. **The HSEval High School Timetable Evaluator**. 2012. Acesso em 19 de outubro de 2023. Disponível em: <<http://jeffreykingston.id.au/cgi-bin/hseval.cgi>>. Citado 4 vezes nas páginas 50, 53, 57 e 62.
- LAARHOVEN, P. J. **Simulated annealing theory and applications**. [S.I.]: Kluwer, 1987. Citado 3 vezes nas páginas 4, 6 e 7.
- POST, G. et al. **XHSTT: An XML archive for high school timetabling problems in different countries - annals of operations research**. Springer US, 2011. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s10479-011-1012-2>>. Citado na página 50.
- POULSEN, C. J. B. **Desenvolvimento de um Modelo para o School Timetabling Problem Baseado na Meta-Heurística Simulated Annealing**. 141 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012. Citado na página 1.
- PRESSMAN, R.; MAXIM, B. **Engenharia de Software - 8<sup>a</sup> Edição**. [s.n.], 2016. ISBN 9788580555349. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=wexzCwAAQBAJ>>. Citado na página 5.
- TAN, J. S. et al. A survey of the state-of-the-art of optimisation methodologies in school timetabling problems. **Expert Systems with Applications**, v. 165, p. 113943, 2021. ISSN 0957-4174. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957417420307314>>. Citado 2 vezes nas páginas 1 e 3.

**TWENTE, U. DMMP - high school Timetabling Project (HSTT): High school timetabling project (HSTT).** 2019. Acesso em 15 de outubro de 2023. Disponível em: <<https://www.utwente.nl/en/eemcs/dmmp/hstt/>>. Citado 7 vezes nas páginas 50, 51, 54, 55, 58, 59 e 60.