

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. 62 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. 62 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 – Aulas constantes	10
Figura 2 – Restrições	11
Figura 3 – Exemplo de região	13
Figura 4 – Exemplo de grupo de alinhamento sobre a grade horária gerada	14
Figura 5 – Efeito de grupo de alinhamento	15
Figura 6 – Configuração de preferências	17
Figura 7 – Mínimos de aulas configuradas na interface	17
Figura 8 – Modelo Entidade-Relacionamento	20
Figura 9 – Consultas de validação da modelagem	21
Figura 10 – Consulta SQL de grade horária com sete salas	21
Figura 11 – Resultado da consulta de uma grade no banco de dados	22
Figura 12 – Diagrama de Casos de Uso	23
Figura 13 – Tela - Listagem de Configurações de Grade	24
Figura 14 – Tela - Estrutura da Escola - Professores	24
Figura 15 – Tela - Estrutura da Escola - Turmas e Turnos	25
Figura 16 – Tela - Aulas por professor	25
Figura 17 – Tela - Restrições e Preferências	26
Figura 18 – Tela - Regiões e Grupos de Alinhamento	26
Figura 19 – Tela - Mínimos e Máximos	27
Figura 20 – Tela - Horários	27
Figura 21 – Modelo Entidade-Relacionamento com adição da tabela de usuários	28
Figura 22 – Tela de Acesso	29
Figura 23 – Método de Cadastro	30
Figura 24 – Método de Login	31
Figura 25 – Middleware de autenticação	32
Figura 26 – Middleware de validação da configuração	32
Figura 27 – Modelo Entidade-Relacionamento com Matérias	34
Figura 28 – Estrutura da Escola com Matérias	34
Figura 29 – Tela de configuração de quantidades de aulas por matéria	35
Figura 30 – Visualização de grade horária com matérias	35
Figura 31 – Mensagem de erro de validação	38
Figura 32 – Grade horária exportada para planilha	39
Figura 33 – Grade horária exportada para planilha	40
Figura 34 – Grade horária exportada para planilha	40
Figura 35 – Constantes configuradas na interface	43
Figura 36 – Restrições e preferências configuradas na interface	44
Figura 37 – Regiões e grupos de alinhamento configuradas para o turno da “Manhã”	45
Figura 38 – Regiões e grupos de alinhamento configuradas para o turno da “Tarde”	45
Figura 39 – Mínimos de aulas configuradas na interface	46
Figura 40 – Visualização de turno da manhã da melhor solução	47
Figura 41 – Grade exportada - Turno da Manhã	48
Figura 42 – Grade exportada - Turno da Tarde	48
Figura 43 – Grade exportada - Solução para a instância Brazillnstance1	51
Figura 44 – Grade exportada - Solução para a instância Brazillnstance5	55
Figura 45 – Solução para a instância Brazillnstance7 - Turmas S1 a S10	59

Figura 46 – Solução para a instância BrazilInstance7 - Turmas S11 a S20 59

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Exemplo de dia com aulas separadas.	8
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 – Métricas de qualidade da melhor solução - BrazillInstance1.	52
Quadro 6 – Limite de dias trabalhados por professor - BrazillInstance5.	54
Quadro 7 – Métricas de qualidade da melhor solução - BrazillInstance5.	55
Quadro 8 – Limite de dias trabalhados por professor - BrazillInstance7.	58
Quadro 9 – Métricas de qualidade da melhor solução - BrazillInstance7.	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Configuração de aulas para validação	42
Tabela 2 – Configuração de Aulas - BrazilInstance1	50
Tabela 3 – Configuração de Aulas - BrazilInstance5	53
Tabela 4 – Configuração de Aulas das turmas S1 a S10 - BrazilInstance7	56
Tabela 5 – Configuração de Aulas das turmas S11 a S20 - BrazilInstance7	57

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

1 – INTRODUÇÃO	1
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
2 – REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1 TIMETABLING PROBLEM	3
2.1.1 Highschool Timetabling Problem	3
2.2 NOVO ENSINO MÉDIO	3
2.3 SIMULATED ANNEALING	4
3 – DESENVOLVIMENTO	5
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	7
3.3.2.1 Agrupamento de aulas	7
3.3.2.2 Constantes	9
3.3.2.3 Restrições	10
3.3.2.4 Limite de dias trabalhados	12
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	27
3.3.5.1 Adaptação do banco de dados	28
3.3.5.2 Tela de login	28
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	33
3.3.6.2 Alteração de telas	34
3.3.6.3 Alteração de métodos no servidor	35
3.3.6.4 Matérias no otimizador	36
3.3.7 VALIDAÇÃO DE CONFIGURAÇÕES	38
3.3.8 EXPORTAÇÃO DE GRADES HORÁRIAS	39

4 – ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	41
4.1 VALIDAÇÃO GERAL	41
4.2 VALIDAÇÃO COM DATASETS PÚBLICOS	50
4.2.1 Instância 1	50
4.2.2 Instância 2	53
4.2.3 Instância 3	56
5 – CONCLUSÃO	61
Referências	62

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 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. O problema consiste em 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 sala e restrições. Adequando estas necessidades à formulação do *timetabling problem*, os encontros que desejamos alocar são entre os professores e determinada sala de aula, 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 ([BRASIL, 2017](#)), o novo modelo traz ainda mais desafios para a tarefa de organização de grades horárias escolares.

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 porte menor 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 da grade.

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 em 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. Para realizar esta tarefa, aplicou-se a meta-heurística de *simulated annealing*, originando o algoritmo 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

$temperatura \leftarrow TI$

$grade \leftarrow \text{CriaGradeInicial}(LP, LT, MA)$

$minConflitos \leftarrow \text{NumeroConflitos}(grade)$

while condição de parada não atingida **do**

for passo = 0 até numeroPassos **do**

$turma \leftarrow \text{EscolheTurmaAleatoria}()$

$linhas \leftarrow \text{EscolheHorariosAleatoriosValidos}(sala)$

$delta \leftarrow \text{CalculaDelta}(sala, linhas)$

$probabilidade \leftarrow e^{-delta/temperatura}$

$valorAceite \leftarrow \text{Aleatorio}(0, 1)$

if $delta < 0$ ou $probabilidade \geq valorAceite$ **then**

$\text{PermutaProfessores}(sala, linha1, linha2)$

if $\text{NumeroConflitos}(grade) < minConflitos$ **then**

$\text{Imprime}(grade)$

$minConflitos \leftarrow \text{NumeroConflitos}(grade)$

end

end

end

$temperatura \leftarrow temperatura * TR$

end

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 “CriaGradeIncial” 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 (Δ), 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. Esta probabilidade de aceite das trocas é algo padrão para algoritmos de *Simulated Annealing*, conforme Laarhoven (1987).

Em relação à condição de parada, durante o desenvolvimento deste primeiro incremento 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.

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 1 mostra um exemplo de configuração de aulas constantes para determinada grade horária.

Figura 1 – Aulas constantes

Constantes		6 Ano	1 EM	7 Ano	8 Ano	9 Ano
	Dia	Aula				
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 2 demonstra uma configuração de restrições para determinado professor que não pode ser alocado nas duas últimas aulas de qualquer dia da grade horária.

Figura 2 – Restrições

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

Fonte: Autor

No caso das restrições, a métrica associada mensura a quantidade de restrições violadas, ou seja, posições em que determinada aula foi alocada, mas não deveria ter sido.

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.

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 3 demonstra uma configuração utilizada para assegurar que em todos os dias da grade horária, o professor tenha alguma aula alocada no primeiro horário.

Figura 3 – 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

A região configurada na 3 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.

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 4.

Figura 4 – Exemplo de grupo de alinhamento sobre a grade horária gerada

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

Fonte: Autor

O efeito da configuração do grupo de alinhamento da figura 4, pode ser observado na grade horária final gerada na figura 5, com as aulas corretamente alocadas em horários simultâneos.

Figura 5 – Efeito de grupo de alinhamento

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

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 5, 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.

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. Preferência específica de última aula

A Figura 6 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 aulas; e que 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 específica de 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.

Figura 6 – 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

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 7, estas métricas permitem configurar quantidades mínimas e máximas de aulas por dia para cada professor.

Figura 7 – Mínimos de aulas configuradas na interface

Horário										CONFIGURAÇÕES	SAIR		
		Estrutura da Escola	Aulas/Matérias	Aulas constantes	Restrições	Regras de preenchimento	Minimos/Máximos	Horários					
Minimos													
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	!	0	2	!			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 impossível obter uma grade que atenda perfeitamente todas as nuances. 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.EscolheHorariosAleatoriosValidos(sala)
        delta ← grade.CalculaDelta(sala, linhas)
        probabilidade ←  $e^{-\delta/\text{temperatura}}$ 
        valorAceite ← Aleatorio(0, 1)
        if delta < 0 ou probabilidade ≥ valorAceite then
            grade.PermutaProfessores(sala, 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. 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

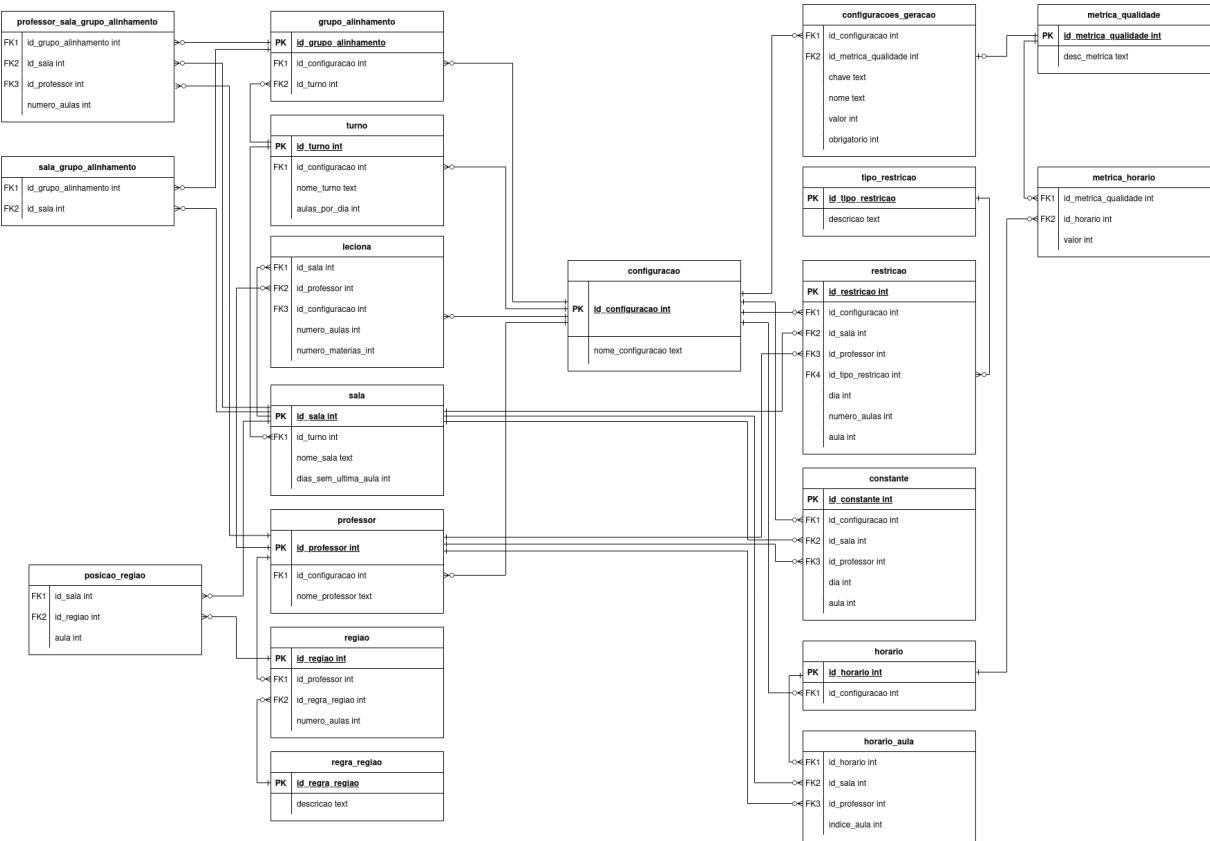
A aplicação do lado do servidor é responsável por receber as requisições da interface, persistir as configurações no banco de dados e realizar a comunicação com o otimizador, a fim de produzir e armazenar as grades horárias.

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 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.

A modelagem comentada está representada na [Figura 8](#):

Figura 8 – Modelo Entidade-Relacionamento



Fonte: Autor

Na [Figura 8](#), 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.

Para validar a modelagem do banco de dados, realizaram-se inserções de informações de exemplo nas diferentes tabelas. A [Figura 9](#) mostra algumas dessas inserções e os vínculos instituídos pelos identificadores escolhidos.

Figura 9 – 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_configuracao, id_horario) VALUES(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, 1, 0, 0);
> INSERT INTO tipo_restricao (id_tipo_restricao, descricao, nome_xml) VALUES(0, 'Proibir', 'normal');
> INSERT INTO restricao (id_configuracao, id_sala, id_professor, tipo, dia, aula, num_aulas) VALUES(1, 1, 1, 0, 0, 0, NULL);
> INSERT INTO configuracoes_geracao (chave_xml, nome, valor, tipo, id_configuracao, obrigatorio) VALUES('Conflitos', NULL, 60, 'setting', 1, 1);
> 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

Validou-se também o armazenamento das grades horárias no banco de dados. A Figura 10 traz um exemplo de consulta de uma grade horária com sete salas:

Figura 10 – Consulta SQL de grade horária com sete salas

```

@SELECT
CASE (a.n / 6)
    WHEN 0 THEN 'Segunda'
    WHEN 1 THEN 'Terça'
    WHEN 2 THEN 'Quarta'
    WHEN 3 THEN 'Quinta'
    WHEN 4 THEN 'Sexta'
    ELSE NULL
END AS "DiaSemana",
(a.n % 6) + 1 AS "Aula",
p1.nome_professor AS "6Ano",
p2.nome_professor AS "7Ano",
p3.nome_professor AS "8Ano",
p4.nome_professor AS "9Ano",
p5.nome_professor AS "1EM",
p6.nome_professor AS "2EM",
p7.nome_professor AS "3EM"
FROM generate_series(0, 29) AS a(n)
LEFT JOIN horario_aula hal ON hal.id_sala = 2 AND hal.index_aula = a.n AND hal.id_horario = 10848
LEFT JOIN professor p1 ON p1.id_professor = hal.id_professor
LEFT JOIN horario_aula ha2 ON ha2.id_sala = 3 AND ha2.index_aula = a.n AND ha2.id_horario = 10848
LEFT JOIN professor p2 ON p2.id_professor = ha2.id_professor
LEFT JOIN horario_aula ha3 ON ha3.id_sala = 4 AND ha3.index_aula = a.n AND ha3.id_horario = 10848
LEFT JOIN professor p3 ON p3.id_professor = ha3.id_professor
LEFT JOIN horario_aula ha4 ON ha4.id_sala = 5 AND ha4.index_aula = a.n AND ha4.id_horario = 10848
LEFT JOIN professor p4 ON p4.id_professor = ha4.id_professor
LEFT JOIN horario_aula ha5 ON ha5.id_sala = 6 AND ha5.index_aula = a.n AND ha5.id_horario = 10848
LEFT JOIN professor p5 ON p5.id_professor = ha5.id_professor
LEFT JOIN horario_aula ha6 ON ha6.id_sala = 7 AND ha6.index_aula = a.n AND ha6.id_horario = 10848
LEFT JOIN professor p6 ON p6.id_professor = ha6.id_professor
LEFT JOIN horario_aula ha7 ON ha7.id_sala = 8 AND ha7.index_aula = a.n AND ha7.id_horario = 10848
LEFT JOIN professor p7 ON p7.id_professor = ha7.id_professor
ORDER BY a.n;

```

Fonte: Autor

A consulta anterior traz como resultado a tabela visível na Figura 11, com linhas e colunas correspondentes a horários de aulas e salas respectivamente.

Figura 11 – Resultado da consulta de uma grade no banco de dados

DiaSemana	Aula	6Ano	7Ano	8Ano	9Ano	1EM	2EM	3EM
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]	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	Adriana	Glaucia	Adriana
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	Luciano

Fonte: Autor

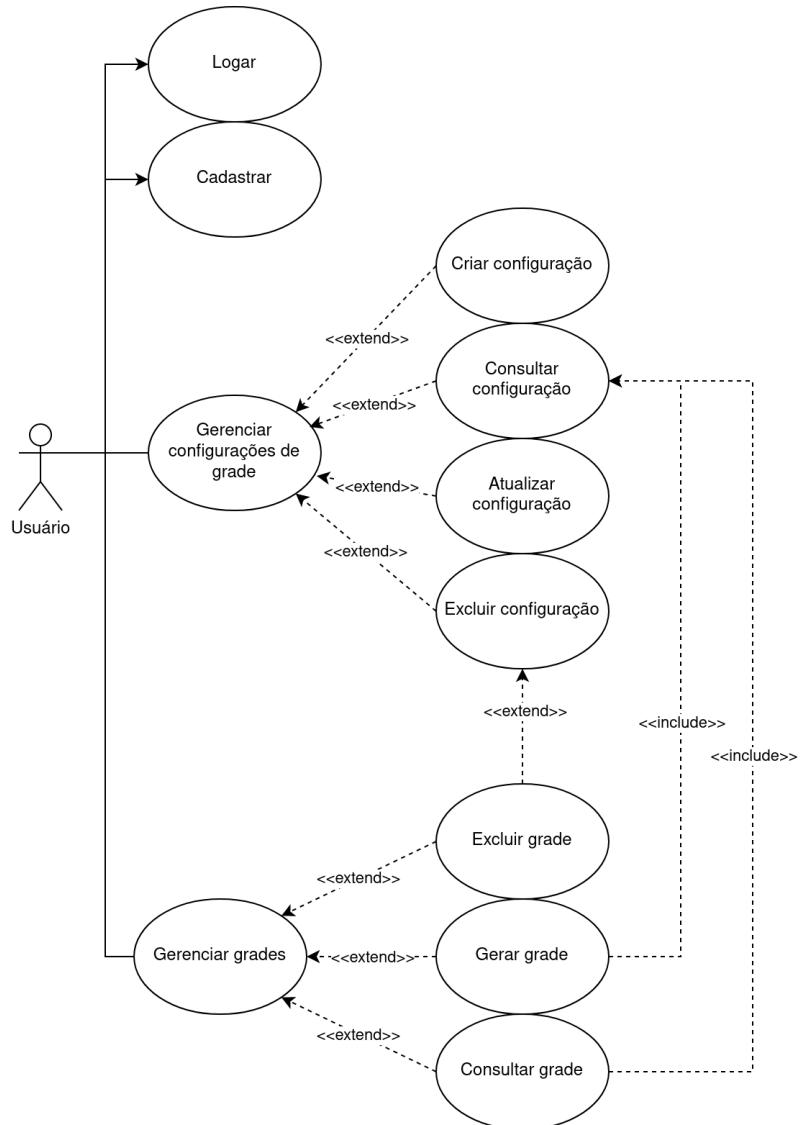
3.3.4 INTERFACE

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 12 mostra os casos de uso que a interface *web* é responsável por disponibilizar:

Figura 12 – Diagrama de Casos de Uso



Fonte: Autor

A [Figura 13](#) mostra a tela de listagem de configurações de grade. 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 13 – Tela - Listagem de Configurações de Grade

Configurações de horário	
Nome	Ações
Teste	
Leme	
LemeMultiTurno	

Fonte: Autor

A tela mostrada na [Figura 14](#) 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. No topo da tela, a etapa “Estrutura da Escola” encontra-se selecionada.

Figura 14 – Tela - Estrutura da Escola - Professores

Professores	
Nome	Ações
Fábio	
Adriana	
Luciana	
Luciano	
Jack	
Glaucia	
Renata	
Besíriz	
Rosa	
Jéssica	
Cristiane	

Turnos		
Nome	Aulas por dia	Ações
...	...	
...	...	

Fonte: Autor

Na [Figura 15](#), tem-se a continuação da tela de estrutura da escola, mostrada na [Figura 14](#). Esta parte da tela é responsável pela configuração das turmas e turnos da escola.

Figura 15 – Tela - Estrutura da Escola - Turmas e Turnos

Nome	Aulas por dia	Ações
Manhã	6	

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

SALVAR **PRÓXIMA ETAPA** **GERAR DADOS EXEMPLO**

Fonte: Autor

Na tela da [Figura 16](#), o usuário pode realizar a configuração de número de aulas que cada professor deve ministrar em cada sala, informação fundamental para a geração das grades horárias.

Figura 16 – Tela - Aulas por professor

Professor	6 Ano	7 Ano	8 Ano	9 Ano	1 EM	2 EM	3 EM	Total
Fabio	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
Luciano	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

A tela da [Figura 17](#) é 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 17 – Tela - Restrições e Preferências](#)

Fonte: Autor

Já a tela da [Figura 18](#) possibilita a configuração das regiões e grupos de alinhamento:

[Figura 18 – Tela - Regiões e Grupos de Alinhamento](#)

Fonte: Autor

A última tela relacionada a configurações pode ser vista na [Figura 19](#), e permite a definição de quantidade mínimas e máximas de aulas para cada professor em cada dia da grade horária:

A etapa final no fluxo da aplicação é representada pela tela da [Figura 20](#). Nesta, o usuário pode requisitar a geração da grade horária utilizando as configurações realizadas nas etapas anteriores, e acessar as grades geradas anteriormente.

Figura 19 – Tela - Mínimos e Máximos

SALVAR

Fonte: Autor

Figura 20 – Tela - Horários

Fonte: Autor

3.3.5 USUÁRIOS E AUTENTICAÇÃO

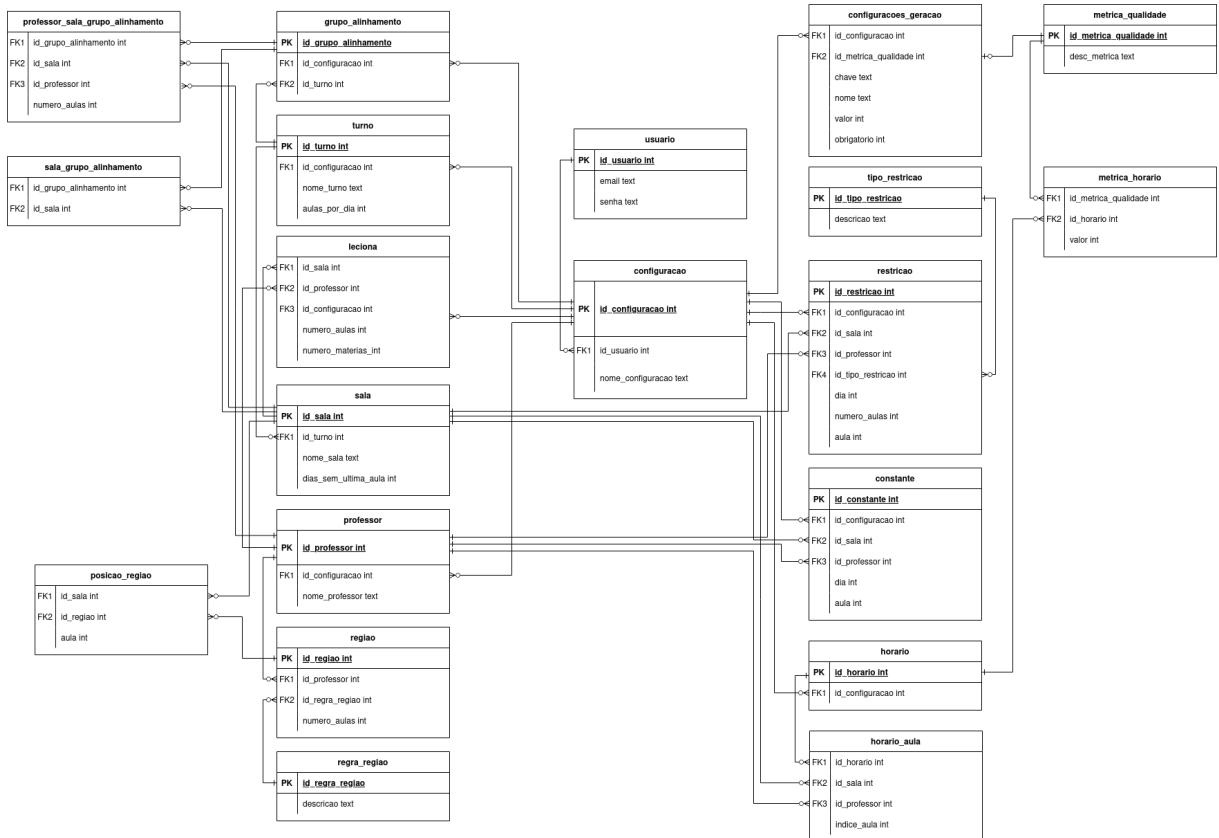
Para controlar a visibilidade de informações no sistema desenvolvido, implementou-se um sistema de usuários. A melhoria consistiu na:

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 21.

Figura 21 – Modelo Entidade-Relacionamento com adição da tabela de usuários

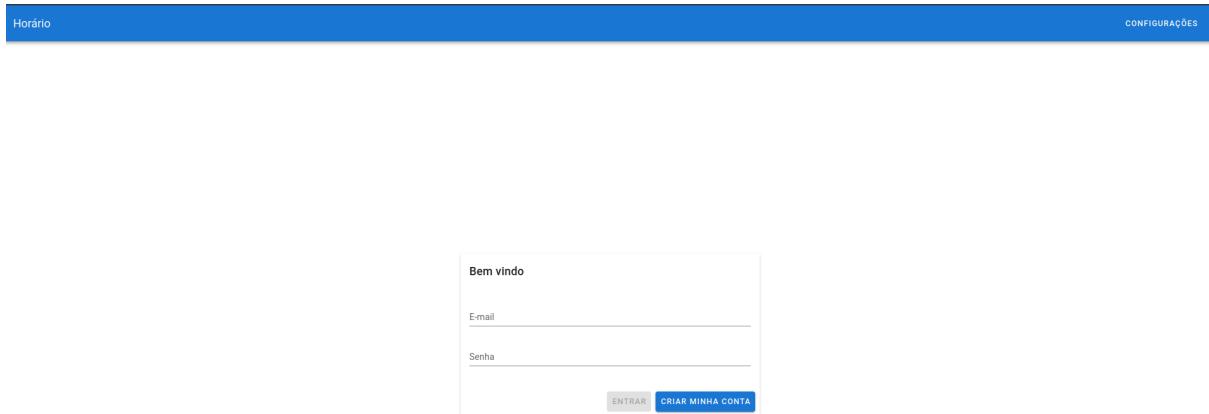


Fonte: Autor

3.3.5.2 Tela de login

Como pode ser visto na figura 22, desenvolveu-se uma tela simples de *login*, a qual também desempenha a função de cadastro de novos usuários.

Figura 22 – 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 23. 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 23 – 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 24 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 24 – 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 25, essa verificação é realizada através da verificação da presença de um *token* JWT válido no header “*authorization*” da requisição.

Figura 25 – 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 26. Caso o usuário não tenha um vínculo com a configuração que está tentando acessar, a requisição é bloqueada.

Figura 26 – 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 salas e cada posição na matriz representava qual professor deveria ministrar a aula naquele horário.

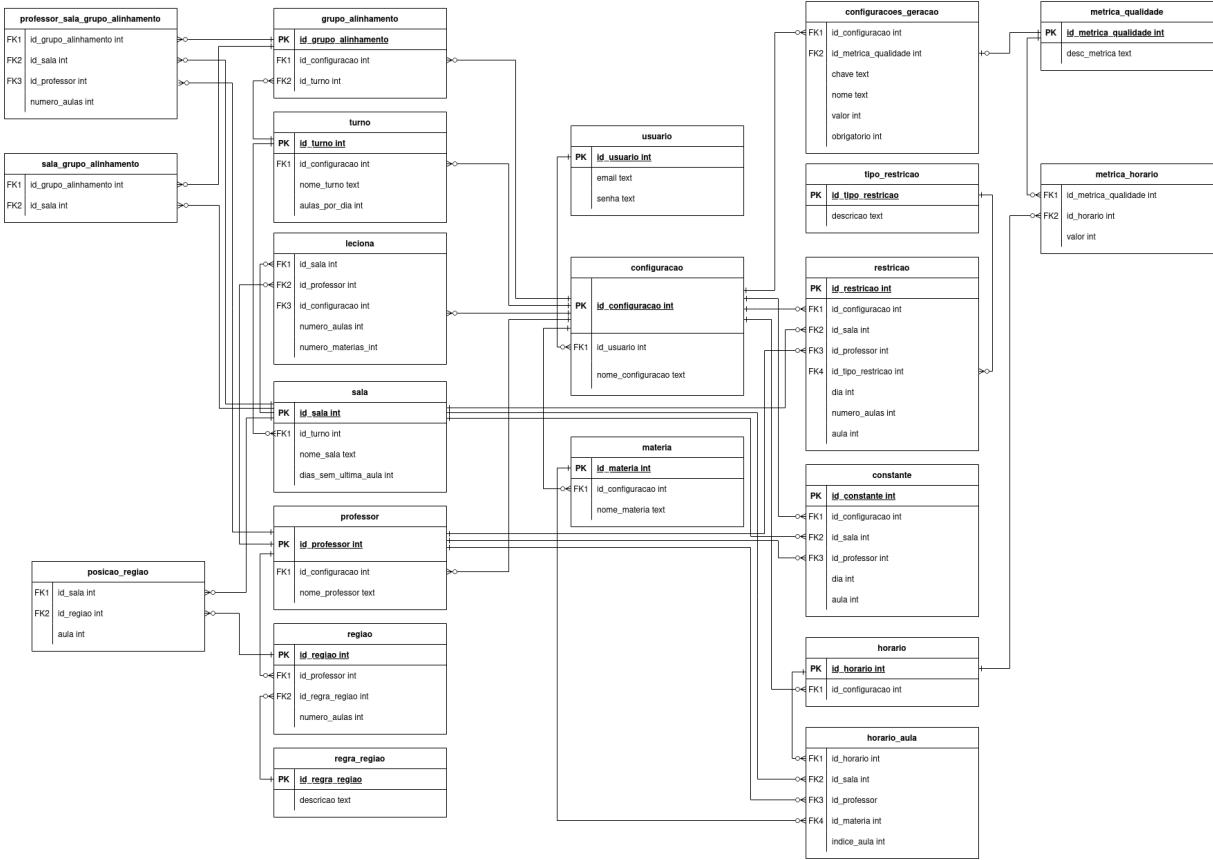
A alocação dos professores é muito importante para a resolução do problema, pois apresenta a maior parte das restrições e dificuldades relacionadas, como os conflitos, por exemplo. Entretanto, em termos de completude, as grades horárias devem ter também a alocação de matérias em cada horário de aula, 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 27.

Figura 27 – 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 "Estrutura da Escola", cuja alteração pode ser vista na figura 28 consistiu na adição de uma seção para cadastro e visualização de matérias, semelhante ao componente de cadastro de professores.

Figura 28 – Estrutura da Escola com Matérias

A interface web 'Estrutura da Escola' apresenta a seguinte estrutura:

- Barra superior:** Horário, CONFIGURAÇÕES, Sair.
- Barra de navegação:** Estrutura da Escola, Aulas/Materias, Aulas constantes, Restrições, Regras de preenchimento, Máximos/Mínimos, Horários.
- Lista de Materiais:** Exibe uma lista de matérias com campos Nome e Ações.
- Formulário para Nova Materia:** NOVA MATERIA, com campo Nome e botões para Ações.
- Botões de navegação:** SALVAR, Cancelar.

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 29.

Figura 29 – Tela de configuração de quantidades de aulas por matéria

Aulas de Verônica em Manhã						
Materia	6 Ano	7 Ano	8 Ano	9 Ano	1ºM	Ações
Sociologia	0	0	0	0	1	
Geografia	3	3	3	3	2	

Students:

- Adriana
- Luciana
- Luciano
- Jack
- Gláucia
- Renata
- Beatriz
- Rose
- Jessica
- Cristina
- Fábio

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 30.

Figura 30 – Visualização de grade horária com matérias

Horário (706)						
	1 Ano	2 Ano	3 Ano	4 Ano	5 Ano	1ºM
Matéria	Português	Português	Português	Português	Português	Português
Professores	Jack	Jack	Jack	Jack	Jack	Jack
Quantidades	1	1	1	1	1	1
Matéria	Matemática	Matemática	Matemática	Matemática	Matemática	Matemática
Professores	Rose	Rose	Rose	Rose	Rose	Rose
Quantidades	1	1	1	1	1	1
Matéria	Inglês	Inglês	Inglês	Inglês	Inglês	Inglês
Professores	Jessica	Jessica	Jessica	Jessica	Jessica	Jessica
Quantidades	1	1	1	1	1	1
Matéria	Ciências	Ciências	Ciências	Ciências	Ciências	Ciências
Professores	Adriana	Adriana	Adriana	Adriana	Adriana	Adriana
Quantidades	1	1	1	1	1	1
Matéria	Artes	Artes	Artes	Artes	Artes	Artes
Professores	Cristina	Cristina	Cristina	Cristina	Cristina	Cristina
Quantidades	1	1	1	1	1	1

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 seão 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(sala, 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

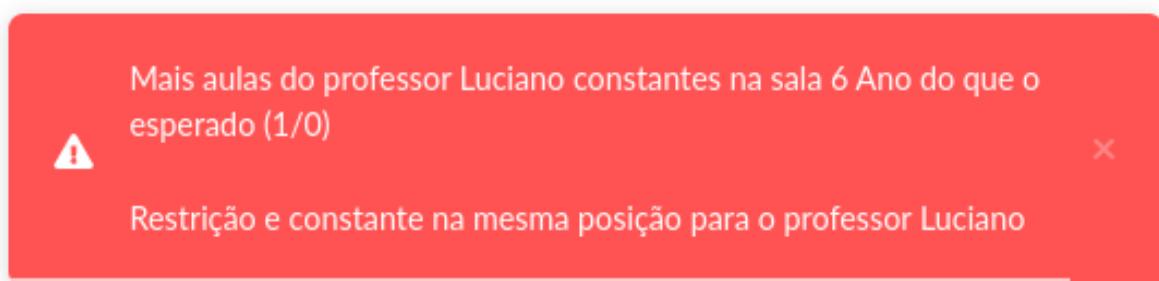
Devido à grande quantidade de configurações necessárias para parametrizar a geração de uma grade horária, erros de configurações por parte dos usuários são inevitáveis. Tendo isto em mente, implementou-se uma seção de código no otimizador, responsável pela validação das informações providenciadas pelo 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. Existem turnos, turmas, professores e matérias configurados;
2. O total de aulas configurado para cada sala deve ser correto, de acordo com o número de dias da grade horária e quantidade de aulas por dia;
3. Para cada sala, nenhum professor pode ter mais aulas agendadas do que a sala acomoda;
4. Nenhum professor pode ter mais aulas constantes configuradas do que o seu total de aulas naquela sala;
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 salas, 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 salas 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 31](#), e a geração da grade horária é cancelada.

Figura 31 – 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 32](#).

Figura 32 – 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 [33](#):

Figura 33 – 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	Luciana	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	Filosofia	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 34:

Figura 34 – 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	Luciana	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	Literatura		
	3	Adriana	Ciências	Jack		Aulas separadas	32	Suave	Biologia		
	4	Adriana	Ciências	Jack		Dias de professores sem aulas duplas	0	Suave	Artes		
	5	Renata	História	Verônica					Geografia		
	6								Matemática		
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](#) evidenciará 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 *datasets* públicos.

4.1 VALIDAÇÃO GERAL

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. O quadro ?? 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 salas. 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 35 – 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

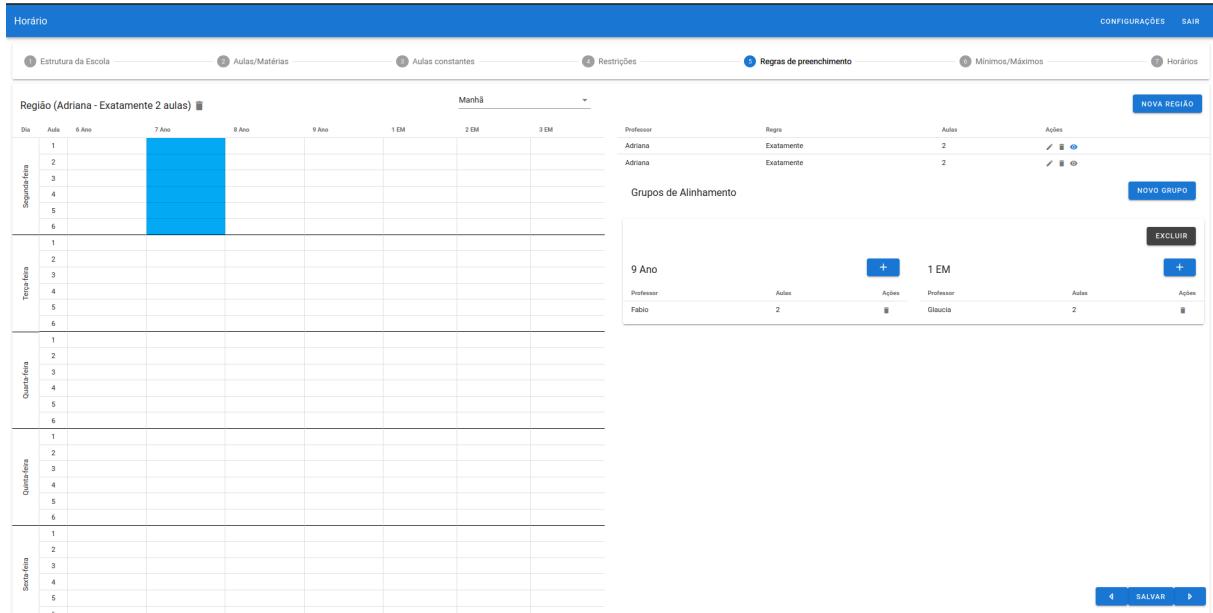
Figura 36 – Restrições e preferências configuradas na interface

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										

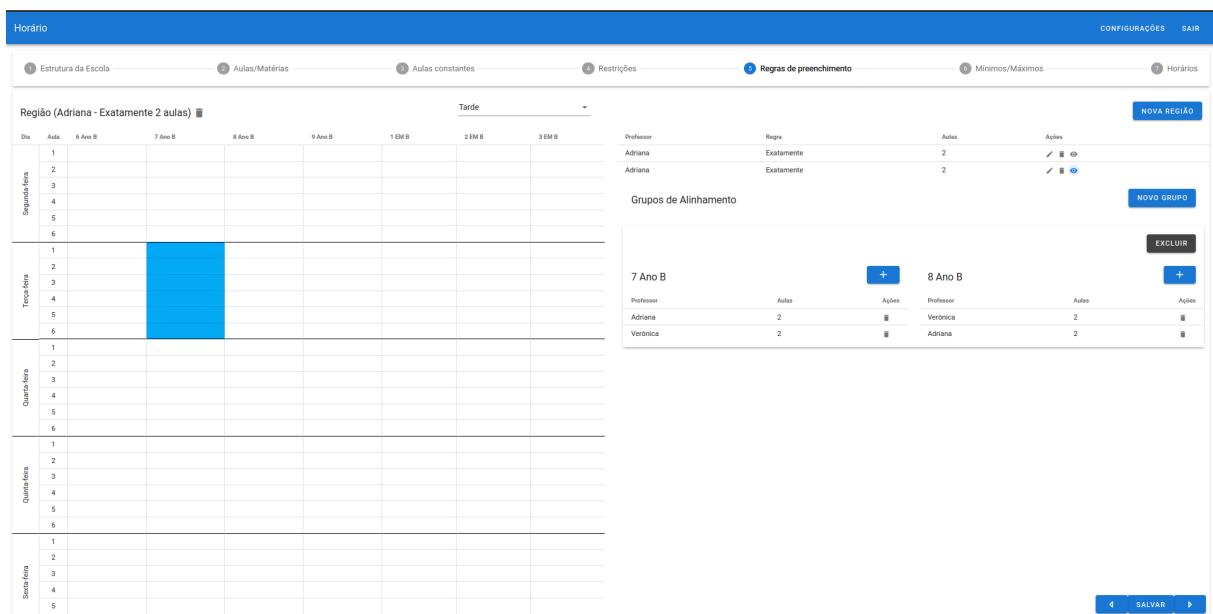
Fonte: Autor

Figura 37 – Regiões e grupos de alinhamento configuradas para o turno da “Manhã”



Fonte: Autor

Figura 38 – Regiões e grupos de alinhamento configuradas para o turno da “Tarde”



Fonte: Autor

Figura 39 – Mínimos de aulas configuradas na interface

Horário						CONFIGURAÇÕES SAIR							
Estrutura da Escola		Aulas/Matérias		Aulas constantes		Restrições		Regras de preenchimento		Mínimos/Máximos		Horários	
Mínimos						Limites diários							
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 35, 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 36, 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 37 e 38;
- 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 37 e 38;
- Mínimos e limites diários:** Como pode ser visto na figura 39, 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, “Glaucia” 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 40, 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 41 e 42, respectivamente.

Figura 40 – 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 41 – 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	Biología	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	Biología	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	Biología	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	Biología	Adriana	Matemática	Glaucia	História	Renata
	3	Espanhol	Jack	Filosofia	Jéssica	Matemática	Rosa	Geografia	Verônica	Matemática	Glaucia	Biología	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	Biología	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 42 – 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	Biología	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	Biología	Adriana	História	Renata
	5	Inglês	Jéssica	Matemática	Rosa	ED. Física	Beatriz	Of. Texto	Luciana	Geografia	Verônica	Sociologia	Fabio	Biología	Adriana
	6	Filosofia	Jéssica							Inglês	Jéssica	Física	Biología	Adriana	Química
Terça-feira	1	Matemática	Rosa	Of. Texto	Luciana	Inglês	Jéssica	História	Renata	Geografia	Verônica	Matemática	Glaucia	Biología	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	Português	Luciana	Artes	Jéssica	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			Matemática	Rosa	Português	Luciana	Ciências	Adriana	Geografia	Verônica	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	Artes	Jéssica	Biología	Adriana
	4	História	Renata	Espanhol	Jack	Português	Luciana	Artes	Jéssica	Geografia	Verônica	Química	Adriana	Geografia	Verônica
	5	Português	Jack	Inglês	Jéssica	Português	Luciana	Matemática	Fabio	Geografia	Verônica	Geografia	Adriana	Geografia	Verônica
	6									Português	Luciana	Espanhol	Jack		
Sexta-feira	1	Português	Jack	Matemática	Rosa	Filosofia	Jéssica	Matemática	Fabio	História	Renata	Biología	Adriana	Portugues	Luciana
	2	Português	Jack	Artes	Jéssica	Matemática	Rosa	Matemática	Fabio	História	Renata	Biología	Adriana	Portugues	Luciana
	3	Matemática	Rosa	Inglês	Jéssica	Of. Texto	Luciana	História	Renata	Biología	Adriana	Espanhol	Jack	Física	Fabio
	4	Inglês	Jéssica	Português	Jack	Português	Luciana	Geografia	Verônica	Biología	Adriana	História	Renata	Física	Fabio
	5	Ciências	Adriana	História	Renata	Geografia	Verônica	Inglês	Jéssica	Física	Fabio	Matemática	Glaucia	Literatura	Luciana
	6	Of. Texto	Luciana	Ciências	Adriana					P. Vida	Fabio	Matemática	Glaucia	Geografia	Verônica

Fonte: Autor

Observando as figuras 41 e 42, constata-se que:

1. Foi alocada a quantidade correta de aulas para cada professor e matéria, nas salas corretas, de acordo com o quadro ??;
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 37 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 38 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 Twente () hospeda publicamente diversas instâncias do problema no formato HXSTT. Destas, selecionaram-se três instâncias brasileiras para complementar a validação do sistema desenvolvido, utilizando dados externos. As próximas subseções apresentarão cada instância e os resultados relacionados.

4.2.1 Instância 1

A primeira instância de teste, identificada como “BrazillInstance1”, 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 - BrazillInstance1.

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: Autoria própria

Os requisitos associados à instância são:

1. Requisito 1 (obrigatório) : Não devem existir conflitos;
2. Requisito 2 (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.

Dado um limite de execução de 10 segundos, o otimizador produziu como melhor solução a grade horária presente na figura 43, cujas métricas de qualidade podem ser vistas no quadro 5. Esta solução atende totalmente os requisitos obrigatórios da instância, e atende parcialmente os requisitos não obrigatórios.

Figura 43 – Grade exportada - Solução para a instância BrazillInstance1

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

Fonte: Autor

Quadro 5 – Métricas de qualidade da melhor solução - BrazillInstance1.

Nome	Valor	Tipo
Aulas desagrupadas	0	Rígida
Aulas em grupos de alinhamento não alinhadas	0	Rígida
Conflitos	0	Rígida
Dias com todos professores diferentes	0	Rígida
Erros nas regiões	0	Rígida
Excessos de aulas iguais	0	Rígida
Excessos de matérias iguais	0	Rígida
Horários com janela (total de todos professores)	0	Rígida
Limites diários violados	0	Rígida
Matérias desagrupadas	0	Rígida
Mínimos opcionais violados	0	Rígida
Mínimos violados	0	Rígida
Restrições violadas	0	Rígida
Excessos de dias trabalhados	7	Suave
Aulas separadas	19	Suave
Dias de professores sem aulas duplas	2	Suave
Matérias separadas	19	Suave
Número de grupos de alinhamento formados	0	Suave
Preferências não resolvidas	0	Suave
Restrições opcionais violadas	0	Suave

Fonte: Autoria própria

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: Autoria própria

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 6;
4. Requisito 4 (não obrigatório) : Requisitos de quantidades mínimas de aulas duplas, o qual devido à sua extensão e não obrigatoriedade, não será explicitado.

Quadro 6 – Limite de dias trabalhados por professor - BrazillInstance5.

Professor	Limite em dias
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: Autoria própria

Dado um limite de execução de 60 segundos, o otimizador produziu como melhor solução a grade horária presente na figura 44, cujas métricas de qualidade podem ser vistas no quadro 7. Esta solução atende totalmente os requisitos 1 e 3, e atende parcialmente os requisitos não obrigatórios 2 e 4.

Figura 44 – Grade exportada - Solução para a instância BrazilInstance5

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

Fonte: Autor

Quadro 7 – Métricas de qualidade da melhor solução - BrazilInstance5.

Nome	Valor	Tipo
Aulas desagrupadas	0	Rígida
Aulas em grupos de alinhamento não alinhadas	0	Rígida
Conflitos	0	Rígida
Dias com todos professores diferentes	0	Rígida
Erros nas regiões	0	Rígida
Excessos de aulas iguais	0	Rígida
Excessos de matérias iguais	0	Rígida
Limites diários violados	0	Rígida
Matérias desagrupadas	0	Rígida
Mínimos opcionais violados	0	Rígida
Mínimos violados	0	Rígida
Restrições violadas	0	Rígida
Excessos de dias trabalhados	0	Suave
Horários com janela (total de todos professores)	11	Suave
Aulas separadas	99	Suave
Dias de professores sem aulas duplas	24	Suave
Matérias separadas	99	Suave
Número de grupos de alinhamento formados	0	Suave
Preferências não resolvidas	0	Suave
Restrições opcionais violadas	0	Suave

Fonte: Autoria própria

4.2.3 Instância 3

A terceira instância de teste, identificada como “BrazilInstance7”, 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 - BrazilInstance7.

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: Autoria própria

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: Autoria própria

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 8;
4. Requisito 4 (não obrigatório) : Requisitos de quantidades mínimas de aulas duplas, o qual devido à sua extensão e não obrigatoriedade, não será explicitado.

Quadro 8 – 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: Autoria própria

A melhor solução gerada em um intervalo de 60 segundos pode ser vista nas figuras 45 e 46. Vale ressaltar que todas as salas 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.

As métricas de qualidade desta solução podem ser observadas no quadro 9, e indicam que foram atendidos totalmente os requisitos 1 e 3, e parcialmente atendidos os requisitos não obrigatórios 2 e 4.

Figura 45 – Solução para a instância BrazilInstance7 - Turmas S1 a S10

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

Fonte: Autor

Figura 46 – Solução para a instância BrazilInstance7 - Turmas S11 a S20

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

Fonte: Autor

Quadro 9 – Métricas de qualidade da melhor solução - BrazillInstance7.

Nome	Valor	Tipo
Aulas desagrupadas	0	Rígida
Aulas em grupos de alinhamento não alinhadas	0	Rígida
Conflitos	0	Rígida
Dias com todos professores diferentes	0	Rígida
Erros nas regiões	0	Rígida
Excessos de aulas iguais	0	Rígida
Excessos de matérias iguais	0	Rígida
Limites diários violados	0	Rígida
Matérias desagrupadas	0	Rígida
Mínimos opcionais violados	0	Rígida
Mínimos violados	0	Rígida
Restrições violadas	0	Rígida
Excessos de dias trabalhados	3	Suave
Aulas separadas	164	Suave
Dias de professores sem aulas duplas	43	Suave
Horários com janela (total de todos professores)	20	Suave
Matérias separadas	164	Suave
Número de grupos de alinhamento formados	0	Suave
Preferências não resolvidas	0	Suave
Restrições opcionais violadas	0	Suave

Fonte: Autoria própria

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.

Considerando o grau de configuração atingido para as grades horárias, a performance do otimizador e atendimento às métricas de qualidade, 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 reportar o progresso da geração das grades

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, 7 e 61.
- 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>. 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.
- LAARHOVEN, P. J. **Simulated annealing theory and applications**. [S.I.]: Kluwer, 1987. Citado 2 vezes nas páginas 4 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 - 8ª 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)**. Disponível em: <<https://www.utwente.nl/en/eemcs/dmmp/hstt/>>. Citado na página 50.