



BACHAREL EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

**ELABORAÇÃO DE QUADROS DE HORÁRIOS DE AULAS PARA O
INSTITUTO FEDERAL GOIANO: UMA ABORDAGEM
HEURÍSTICA**

THIAGO RAFAEL MARIOTTI CLAUDIO

Rio Verde, GO

2023



INSTITUTO FEDERAL GOIANO - CAMPUS RIO VERDE
BACHAREL EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

**ELABORAÇÃO DE QUADROS DE HORÁRIOS DE AULAS PARA O
INSTITUTO FEDERAL GOIANO: UMA ABORDAGEM
HEURÍSTICA**

THIAGO RAFAEL MARIOTTI CLAUDIO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Federal Goiano - Campus Rio Verde, como requisito parcial para a obtenção do Grau de Bacharel em Ciência da Computação.

Orientador: Prof. Dr. Márcio Antônio Ferreira Belo Filho

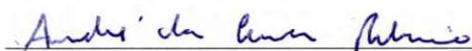
Rio Verde, GO

Agosto, 2023

THIAGO RAFAEL MARIOTTI CLAUDIO

**ELABORAÇÃO DE QUADROS DE HORÁRIOS DE AULAS PARA O
INSTITUTO FEDERAL GOIANO: UMA ABORDAGEM
HEURÍSTICA**

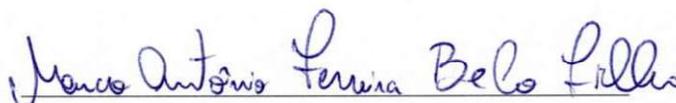
Trabalho de curso DEFENDIDO E APROVADO em 18 de agosto de 2023, pela
Banca Examinadora constituída pelos membros:



André da Cunha Ribeiro
Instituto Federal Goiano



Douglas Cedrim Oliveira
Instituto Federal Goiano



Prof. Dr. Márcio Antônio Ferreira Belo Filho
Orientador

Rio Verde, GO

2023

Sistema desenvolvido pelo ICMC/USP
Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas - Instituto Federal Goiano

MC615e Mariotti Claudio, Thiago Rafael
Elaboração de quadros de horários de aulas para o
Instituto Federal Goiano: uma abordagem heurística /
Thiago Rafael Mariotti Claudio; orientador Márcio
Antônio Ferreira Belo Filho. -- Rio Verde, 2023.
31 p.

TCC (Graduação em Ciência da Computação) --
Instituto Federal Goiano, Campus Rio Verde, 2023.

1. Quadro de Horário de Aulas. 2. Fix-and-
Optimize. 3. Pesquisa Operacional. I. Belo Filho,
Márcio Antônio Ferreira, orient. II. Título.



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

Identificação da Produção Técnico-Científica (assinale com X)

- Tese
- Dissertação
- Monografia - Especialização
- Artigo - Especialização
- TCC - Graduação
- Artigo Científico
- Capítulo de Livro
- Livro
- Trabalho Apresentado em Evento
- Produção técnica. Qual: _____

Nome Completo do Autor: Thiago Rafael Mariotti Claudio

Matrícula: 2019102201940100

Título do Trabalho: Elaboração de quadros de horários de aulas para o Instituto Federal Goiano: uma abordagem heurística

Restrições de Acesso ao Documento [Preenchimento obrigatório]

Documento confidencial: Não Sim, justifique: Parte dos dados coletados e do método desenvolvido serão submetidos como artigo em periódico.

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: 01/01/2024

O documento está sujeito a registro de patente? Sim Não

O documento pode vir a ser publicado como livro? Sim Não

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

1. O documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
2. Obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
3. Cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

Rio Verde, 28 de agosto de 2023

Thiago Rafael Mariotti Claudio

Assinado eletronicamente pelo o Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

Ciente e de acordo:

Márcio Antônio Ferreira Belo Filho

Assinatura eletrônica do(a) orientador(a)

Documento assinado eletronicamente por:

- **Marcio Antonio Ferreira Belo Filho, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 04/09/2023 09:44:33.
- **Thiago Rafael Mariotti Claudio, 2019102201940100 - Discente**, em 28/08/2023 14:04:24.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 28/08/2023. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 526061
Código de Autenticação: 93982ddc3c



INSTITUTO FEDERAL GOIANO
Campus Rio Verde
Rodovia Sul Goiana, Km 01, Zona Rural, 01, Zona Rural, RIO VERDE / GO, CEP 75901-970
(64) 3624-1000



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO

Ata nº 33/2023 - GEPTNM-RV/DE-RV/CMPRV/IFGOIANO

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CURSO

Ao(s) 18 dia(s) do mês de agosto de 2023, às 09 horas e 25 minutos, reuniu-se a banca examinadora, de forma presencial no bloco de computação, composta pelos docentes: Márcio Antônio Ferreira Belo Filho (orientador), André da Cunha Ribeiro (membro) e Douglas Cedrim Oliveira (membro), para examinar o Trabalho de Curso intitulado “Elaboração de Quadros de Horários de Aulas para o Instituto Federal Goiano: Uma Abordagem Heurística” do(a) estudante Thiago Rafael Mariotti Cláudio, Matrícula nº 2019102201940100 do Curso de Bacharelado em Ciência da Computação do IF Goiano – Campus Rio Verde. A palavra foi concedida ao(a) estudante para a apresentação oral do Trabalho de Curso, houve arguição do(a) candidato pelos membros da banca examinadora. Após tal etapa, a banca examinadora decidiu pela APROVAÇÃO do(a) estudante. Ao final da sessão pública de defesa foi lavrada a presente ata que segue assinada pelos membros da Banca Examinadora.

(Assinado Eletronicamente)

Márcio Antônio Ferreira Belo Filho

Orientador(a)

(Assinado Eletronicamente)

André da Cunha Ribeiro

Membro

(Assinado Eletronicamente)

Douglas Cedrim Oliveira

Membro

Observação:

Documento assinado eletronicamente por:

- **Andre da Cunha Ribeiro**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 18/08/2023 13:27:21.
- **Douglas Cedrim Oliveira**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 18/08/2023 11:46:28.
- **Marcio Antonio Ferreira Belo Filho**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 18/08/2023 11:44:54.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 17/08/2023. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 522859

Código de Autenticação: 0c7b13f1c3



INSTITUTO FEDERAL GOIANO
Campus Rio Verde
Rodovia Sul Goiana, Km 01, Zona Rural, 01, Zona Rural, RIO VERDE / GO, CEP 75901-970
(64) 3624-1000

Este trabalho é dedicado aos gigantes, cujos ombros tão altos, me ajudaram à ver mais longe.

AGRADECIMENTOS

Um pequeno excerto para agradecer a todos que dispuseram seu precioso e irrecuperável tempo finito para me ajudar: a namorada que sempre foi um apoio emocional e espiritual; a família que foi minha base; o irmão que, ao me olhar com admiração e vigiar minhas contas, me obrigou à ser exemplo; os amigos que forneceram conforto, e as memórias de um dia melhor, que adoçaram a vida nas piores situações.

Agradeço ao excelente corpo docente que cedeu seus ensinamentos e fomentou minha fome pelo conhecimento, e que com sua didática me mostrou o valor de aprender, pesquisar e contribuir. Em especial ao meu orientador Márcio Antônio Ferreira Belo Filho, que me guiou nessa jornada, como mentor, professor e amigo.

Por fim, agradeço à mim mesmo, por não ter desistido mesmo quando fraquejei, mesmo quando contemplei o vazio, mesmo estagnei. Eu não sou perfeito, e definitivamente não sou a minha própria alma gêmea; mas eu sou tudo que eu tenho. Afinal, todos morreremos sozinhos, mas só seremos um pelo outro.

Paz entre nós; guerra aos senhores.

RESUMO

CLAUDIO, Thiago. **Elaboração de quadros de horários de aulas para o Instituto Federal Goiano: uma abordagem heurística**. Agosto, 2023. 31 f. Monografia – (Curso de Bacharel em Ciência da Computação), Instituto Federal Goiano - Campus Rio Verde. Rio Verde, GO.

A geração de quadro de horários de aulas é uma tarefa extremamente complexa e desafiadora para todas as instituições de ensino, devido à explosão combinatorial de possibilidades de agendamentos para professores, turmas, salas, laboratórios e outros recursos. Em um Instituto Federal, como o IF Goiano - Campus Rio Verde, tal tarefa acresce dos pesos de que: os professores possuem carga horária extensa e dispersa em vários cursos; o ensino verticalizado promovido por essas instituições permite aulas a diferentes níveis de cursos (técnicos de nível médio, graduações e pós-graduações de nível superior); compartilhamento de recursos como salas, laboratórios e equipamentos para diversas turmas. Para o auxílio de tal tarefa administrativa, justifica-se o uso de ferramentas computacionais na tomada de decisões, aliviando o fator humano. Desse pretexto surge a pesquisa, que demonstra resultados promissores por meio de uma heurística construtiva, que visa primariamente gerar horários factíveis, para logo em seguida buscar por melhorias utilizando o método *fix-and-optimize*. A heurística construtiva ordena as disciplinas por meio de regras distintas e as aloca gerando novas soluções, respeitando restrições de conflito de horários. A busca local é do tipo *fix-and-optimize*, onde turmas são fixadas enquanto turmas do mesmo curso são reconstruídas, o que permite melhorias consistentes. Este trabalho contribui para o avanço da Pesquisa Operacional no contexto da geração de quadros de horário, fornecendo uma alternativa eficiente, flexível e competitiva para a elaboração de quadros de horários de aulas no Instituto Federal Goiano, Campus Rio Verde. Espera-se que os resultados finais dessa pesquisa possam impactar positivamente a gestão acadêmica e facilitar o processo de planejamento de horários.

Palavras-chave: Quadro de Horário de Aulas, *Fix-and-Optimize*, Pesquisa Operacional

ABSTRACT

CLAUDIO, Thiago. **Developing class timetables for the Federal Institute of Goiano: an heuristic approach**. Agosto, 2023. 31 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Bacharel em Ciência da Computação, Instituto Federal Goiano - Campus Rio Verde. Rio Verde, GO, Agosto, 2023.

The generation of class schedules is an extremely complex and challenging task for all educational institutions, due to the combinatorial explosion of scheduling possibilities for teachers, classes, rooms, labs and other resources. In an Instituto Federal, such as IF Goiano - Rio Verde Campus, this task is compounded by the fact that: teachers have extensive and dispersed workloads across various courses; the vertical education system promoted by these institutions allows for classes at different levels of courses (technical courses, undergraduate, and postgraduate programs); and the sharing of resources such as classrooms, laboratories, and equipment. To aid in this administrative task, the use of computational tools for decision-making is justified, alleviating the human factor. From this pretext arises the research, which demonstrates promising results through a constructive heuristic that aims primarily to generate feasible schedules, followed by seeking improvements using the fix-and-optimize method. The constructive heuristic orders the disciplines through distinct rules and allocates them to generate new solutions, while respecting constraints of time conflicts. The local search is provided by a fix-and-optimize heuristic, in which some classes are fixed while classes from the same course are rearranged, allowing for consistent improvements. This work contributes to the advancement of Operations Research in the context of timetable generation, providing an efficient, flexible, and competitive alternative for creating class schedules at Instituto Federal Goiano, Rio Verde Campus. It is hoped that the final results of this research can positively impact academic management and facilitate the process of schedule planning.

Keywords: University Timetabling. Fix-and-Optimize. Operations Research

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplo de quadro de horários universitário.	3
Figura 2 – Diagrama de classificação das principais meta-heurísticas.	7
Figura 3 – Exemplificação do primeiro estágio do <i>fix-and-optimize</i>	8
Figura 4 – Exemplo de janelas na agenda de um professor qualquer	12
Figura 5 – Diagrama de execução do programa.	17
Figura 6 – Exemplo da planilha gerada para instanciação do problema.	17
Figura 7 – Exemplificação do conceito de splits e carga mínima	18
Figura 8 – Evolução da melhor solução em 2018/1	24
Figura 9 – Evolução da melhor solução em 2018/2	25
Figura 10 – Evolução da melhor solução em 2019/1	25
Figura 11 – Evolução da melhor solução em 2019/2	26
Figura 12 – Evolução da melhor solução em 2022/1	27
Figura 13 – Adaptação do horário original utilizado pela instituição no período. . .	28
Figura 14 – Quadro de horário otimizado obtido pela aplicação.	28

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Relacionamentos de conjuntos	4
Tabela 2 – Cursos ofertados pelo IFGoiano - campus Rio Verde em 2021	9
Tabela 3 – Conjuntos e parâmetros do problema	13
Tabela 4 – Relacionamentos de conjuntos	14
Tabela 5 – Variáveis do sistema matemático proposto	14
Tabela 6 – Comparação dos resultados para todas as instâncias	23
Tabela 7 – Disciplinas ofertados pelo IFGoiano - campus Rio Verde em 2021	27

LISTA DE ALGORITMOS

Algoritmo 1 – Algoritmo guloso como exemplo de heurística construtiva	6
Algoritmo 2 – Ordenar Disciplinas	19
Algoritmo 3 – Inserir Início	19
Algoritmo 4 – Verificar Disponibilidade	20
Algoritmo 5 – Fix-and-Optimize	20
Algoritmo 6 – Busca Local	21

SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO	1
2 – REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1 Problema de Programação de Quadros de Horários Universitários	4
2.1.1 Problemas de Programação com Cursos baseados em Currículos	5
2.2 Estratégias de Solução	5
2.2.1 Heurística Construtiva	6
2.2.2 Meta-heurística	6
2.3 Trabalhos Relacionados	8
3 – DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	9
4 – Materiais e Métodos	12
4.1 Modelo Matemático	12
4.2 Solução Computacional	16
4.2.1 Heurística Construtiva	17
4.2.2 Heurística de Melhoria	20
5 – Resultados e discussões	22
5.1 Instância 2018/1	24
5.2 Instância 2018/2	24
5.3 Instância 2019/1	25
5.4 Instância 2019/2	26
5.5 Instância 2022/1	26
5.6 Exemplo	27
6 – Conclusões	29
Referências	30

1 INTRODUÇÃO

Com o avanço produtivo humano devido às inovações sociais agregadas pelas diversas e constantes revoluções econômicas e industriais, a complexidade de sistemas dos mais variados tipos aumentou drasticamente, englobando diferentes variáveis e situações outrora relevados em um modelo matemático. Desse contexto surge a Pesquisa Operacional, a partir do desenvolvimento do método científico para análise e tomadas de decisões complexas, conforme Arenales et al. (2015), empregando técnicas matemáticas para desenvolvimento de modelos que procuram explicar a situação e observar as possíveis soluções de um problema. Nesse contexto, o advento e avanço computacional como ferramenta auxiliar produtiva agrega diretamente na possibilidade de avanço em território de estudos de sistemas e suas complexidades.

Um das propostas emergentes nesse cenário é o desenvolvimento de quadros de horário - prática comum que envolve alocar logicamente recursos em um plano de tempo para melhor disposição - que lida diretamente com a explosão combinatorial de seus dados, dada a quantidade exorbitante de possibilidades de soluções do problema. Uma subárea desse problema é justamente a prática de *timetabling* universitário (ou alocação de quadros de horário universitários), que visa otimizar a alocação de horários para disciplinas, salas de aula e professores, levando em consideração restrições como preferências de professores, disponibilidade de salas e evitar conflitos de horários para estudantes (BURKE, 1997). O desafio reside na busca por soluções eficientes que atendam a todos os requisitos e restrições, considerando a complexidade do problema e a necessidade de encontrar um equilíbrio entre os diferentes aspectos envolvidos, como a distribuição equitativa de recursos e a maximização da satisfação de todas as partes envolvidas. À medida que o tamanho da instituição e o número de restrições aumentam, o espaço de busca se torna exponencialmente maior, o que torna a resolução exaustiva impraticável. Isso faz com que os algoritmos de otimização e as abordagens heurísticas sejam amplamente utilizados para encontrar soluções aproximadas em um tempo razoável (PETROVIC; BURKE, 2004).

Dito isso, é possível a redução desses problemas combinatoriais em problemas de decisão, mudando a perspectiva do problema em tentar criar diferentes arranjos de quadros de horário para a possibilidade de determinar se é possível alocar todos os eventos em horários sem sobreposições, considerando as restrições e preferências específicas do contexto universitário (ABDULLAH et al., 2012). Nessa recontextualização do problema, tem-se como objetivo verificar a existência de uma solução factível que atenda a todos os requisitos, levando em consideração as restrições de disponibilidade de salas, professores, turmas e outros recursos, evitando seus choques e sobreposições, além de buscar minimizar outros aspectos como tempo de deslocamento entre eventos, segundo Rezaeiapanah, Matoori e Ahmadi (2021); janelas de horário ou até mesmo condensar a agenda para determinados grupos - como graduandos em período de estágio.

Diante desse vasto campo acadêmico pautado em problemas reais, surge a implementação de ferramentas específicas para alocação de quadros de horário, que embora não sejam unanimidade no uso como observa Burke (1997), são empregadas em contextos administrativos e pedagógicos para auxiliar na tomada de decisão durante os processos de definição de quadro de aulas que ocorre entre períodos letivos. Tais ferramentas, apesar de serem desenvolvidas por especialistas visando atender um amplo mercado, enfrentam desafios consideráveis no campo do *timetabling*, pois há uma série de detalhes ligados à

estrutura específica de cada instituição. Nesse sentido, é comum que os softwares e soluções para elaboração de horários em ambientes escolares ou universitários tenham um custo elevado e nem sempre ofereçam a flexibilidade necessária para lidar com demandas específicas, devido às limitações do código e modelo de solução implementado (RASEONYANA; ANDERSON; NKGU, 2019).

Tal situação é observada no Campus Rio Verde do Instituto Federal Goiano de Tecnologia e Ensino, no qual utiliza-se um *software* terceirizado para auxílio no desenvolvimento dos quadros de horários durante o período de elaboração do calendário acadêmico. O *software* utilizado é pago e possui aplicação semestral, entretanto, há poucas possibilidades de alterações de critérios de qualidade da solução (como, janelas de tempo livre para professores e turmas, uso de horários indesejados, dentre outros), não há flexibilidade para alteração de restrições do modelo utilizado no software, nem a designação de salas de aulas e outros recursos.

Nesse contexto, propõe-se por meio desse trabalho o desenvolvimento de uma ferramenta que possa gerar com rapidez, eficiência e credibilidade, quadros de aula para todos os agentes envolvidos (professores, turmas e cursos). Busca-se avaliar a qualidade das soluções e entregar aquela que melhor se encaixe na proposta da função objetivo escolhida para instituição: reduzir quantidades de janelas e horários indesejados para os agentes. Leva-se em consideração a possibilidade de inserir indisponibilidades e preferências de horários de antemão na ferramenta. Dado o teor do trabalho, espera-se como resultados uma ferramenta confiável que possa gerar e auxiliar as tomadas de decisões da equipe administrativa da instituição na etapa de formulação dos horários de disciplinas no período letivo, gerando horários factíveis, de boa qualidade, permitindo a instituição desvencilhar de aplicações terceiras, alocando melhor os recursos monetários em outros campos.

O trabalho segue com uma revisão da literatura no Capítulo 2, onde contextualizamos o problema na literatura e destacamos as principais classificações. Os Capítulos 3 e 4 têm por objetivo, respectivamente, apresentar o problema e as principais motivações do trabalho, e discutir a metodologia empregada para gerar a solução proposta, bem como estratégias e adendos. O Capítulo 5 apresenta os resultados, separados em semestres letivos, obtidos pela solução deste trabalho, e os compara com as soluções originais empregadas pela instituição. Por fim, o Capítulo 6 apresenta o fechamento acerca do trabalho, os resultados obtidos, e propostas de melhorias.

2 REVISÃO DE LITERATURA

O Problema de Programação de Quadro de Horários (PPH), comumente referido pelo termo em inglês *timetabling* é um conjunto de problemas na Pesquisa Operacional que por definição buscam alocar recursos/agentes R em um plano finito de períodos T , formando assim eventos E , que podem ou não ser factíveis dado o conjunto de restrições aplicado, como apontado por Gross, Yellen e Zhang (2013), podendo assim ser aplicado em diversos contextos, como alocação de turnos para colaboradores, locação de espaços físicos como quadras e salões, agendamento de transportes públicos, manutenção em linhas produtivas, horários de professores, dentre outros. Por exemplo, a Figura 1 abaixo apresenta um um quadro de horários em um contexto universitário.

	Room R							
	Room 2							
Room 1								
TIME	MON	TUE	WED	THU	FRI	SAT		
7AM	AR002-NPR		AL002-AAG		AR005-TBH			
8AM	DS002-RWJ	AL002-NPR			AR002-SWN			
9AM				NC002-RVI				
10AM	DS003-RWH	PL004-BBP	HC001-HTT	PL001-AMR				
11AM								
12AM	HC001-HTT		AR002-NPR					
1PM	IM001-JDN	AR002-JPY		IM001-JDN	AL001-AAG			
2PM					AR002-JPY			
3PM			AR005-TBH					
4PM	PL001-AMR							

Figura 1 – Exemplo de quadro de horários universitário.
Fonte: Gozali e Fujimura (2020)

Um das principais subáreas desse problema sendo o *timetabling* escolar (PPHE), tendo seus primórdios no estudo de Gotlieb (1962), que buscava soluções para automatizar a produção de quadros de horários em contextos escolares afim de auxiliar a tomada de decisão humana perante a situação vigente. O problema em questão é definido por De Werra (1985) como o desenvolvimento de grades de horário, representada por um conjunto de dias, estes compostos por um conjunto de horários, para professores e turmas, relacionados por uma mesma disciplina, de modo que obedeça as seguintes restrições:

Tabela 1 – Relacionamentos de conjuntos

Simbologia	Descrição
P_p	Conjunto de professores da instituição
T_t	Conjunto de turmas da instituição
D_d	Conjunto de disciplinas disponíveis
W_d	Conjunto de carga horária da disciplina
i	Índice de um dia letiva
i	Índice de um horário letivo
$i \times j$	Relação de dia e horário letivo do evento

Fonte: (De Werra, 1985)

- Um professor $p \in P$ não pode ministrar mais de uma disciplina $d \in D$ no mesmo dia e horário $i \times j$
- Uma turma $t \in T$ não pode ter duas disciplinas $d \in D$ no mesmo dia e no mesmo horário ($i \times j$)
- A carga horária total de uma disciplina alocada no período disposto de ser igual à carga horária mínima proposta pela grade curricular $d \in W$

2.1 Problema de Programação de Quadros de Horários Universitários

Devido às diferenças significativas na natureza das classes de problemas em programação de quadros de horários, Arenales et al. (2015) observa a importância de distinguir o cerne do que se espera na resolução dos problemas em Pesquisa Operacional, afim de gerar soluções cabíveis à situação observada.

Nesse caso, como aponta Schaefer (1999) em seu trabalho, a classe de Programação de Quadros de Horário Universitários (PPHU) procura encontrar agendas de horários para grupos de alunos com uma grade curricular semelhante, em casos de instituições que utilizam o conceito de pós-matrícula (referido por Problema de Programação de Horários em Cursos Pós-Matrícula, ou PPHPM) no qual estudante seleciona um programa de graduação principal, compondo a maioria da grade curricular; e um complementar, que permite o aluno se especializar em uma sub-área de escolha própria. Nessa situação busca-se reduzir ao máximo a quantidade de sobreposições de eventos para os indivíduos, evitando comprometer o aprendizado com deslocamentos, trocas de salas e conflitos de horários durante o ato de matrícula do ouvinte a disciplina desejada, como observado no modelo de Saviniec (2018), onde:

- O problema de otimização é reduzido à um problema de escolha binário, no qual a variável x_{ptdh} expressa se há ou não agendamento para aquele professor e turma naquele horário, naquela disciplina;
- Não deve existir choque de horário entre turmas, e portanto, uma turma só pode ter uma aula agendada para uma disciplina de um professor em determinado horário;
- Um professor deve ministrar apenas um disciplina em determinado horário, mas turmas diferentes podem assistir à essa disciplina, desde que não haja conflitos com a regra anterior estabelecida;
- As disciplinas têm uma carga horária estipulada que deve ocorrer. O professor no entanto têm um máximo de horas-aula semanais à disposição, e a quantidade de encontros para esse professor não devem extrapolar seu máximo de horas na semana;

- Uma boa solução busca um balanço entre disponibilidade do professor, redução de janelas de tempo com ociosidade e condensação da carga horária da turma;
- Uma turma é composta por alunos com bases currículos semelhantes, e por isso a solução deve evitar ao máximo sobreposição de aulas entre aulas desse grupo disforme.

2.1.1 Problemas de Programação com Cursos baseados em Currículos

O modelo de ensino superior mais comum no Brasil, no entanto, é o modelo de Cursos Baseados em Currículo (PPHUC), na qual o discente têm uma grade curricular fixa, baseada na escolha do curso selecionado durante o ato da matrícula (BETTINELLI et al., 2015).

Essa subclasse de problemas permite uma abordagem diferente do problema monolítico discutido, como aponta (KIEFER; HARTL; SCHNELL, 2017), uma vez que o desenvolvimento do quadro de horários em contexto administrativo entre períodos letivos deve evitar choques de disciplinas entre turmas do mesmo curso, devido a ordem predeterminada de progressão curricular. Isso permite, no entanto, a remoção de restrições referentes ao limite de matriculados em uma disciplina, pois a turma ouvinte tem tamanho predefinido.

É possível também relaxar o problema, fixando turmas para uma única sala, evitando assim conflitos pelo recurso de ensalamento, desde que a instituição disponha de salas suficientes para as turmas em cada turno.

Podemos formular o modelo básico para o problema a partir da definição formal da classe PPHUC conforme a Segunda Competição Internacional de *Timetabling* a partir do trabalho de Gaspero, Schaerf e McCollum (2007):

- Todas as disciplinas de um curso devem ser agendadas, e alocadas para períodos distintos. A solução é considerada infactível na não ocorrência de uma ou mais disciplinas;
- Como o agrupamento regente nessa modalidade é o curso, apenas aulas da mesma grade curricular ou ministradas por um mesmo professor devem ocorrer em períodos diferentes entre si. Nesse caso, no entanto, não podem haver sobreposições de eventos para as turmas, visto que o corpo discente agora é composto por um agrupamento uniforme de base curricular igual.

2.2 Estratégias de Solução

Originária do termo grego *heuristik*, "encontrar", modelos heurísticos são técnicas de solução de problemas aplicadas a situações onde o espaço de busca da solução inviabiliza o uso de métodos exatos. Comumente aplicadas a algoritmos de busca, funções heurísticas procuram avaliar a solução obtida por meio de parâmetros bem definidos para guiar a procura pela solução mais próxima de um ótimo (local) através das diversas ramificações ocorrentes no processo (PEARL, 1984).

Em virtude de sua característica aproximada, é vital a avaliação de viabilidade para implementação de modelos heurísticos, por meio de perguntas que tentam entender o cerne do problema observado. Essas questões fundamentais para escolha e aplicação de uma heurística em um problema são conhecidas como critérios de troca (NEWELL; SIMON, 1976). São eles:

- **Otimidade:** avalia a possibilidade da heurística obter solução ótima em sua aplicação, caso a solução seja estritamente necessária, em detrimento à outros modelos de solução já conhecidos para o problema.
- **Tempo:** avalia se a heurística implementada possui tempo de convergência suficientemente rápido em detrimento a métodos mais tradicionais.
- **Acurácia:** verifica se as soluções obtidas pela heurística estão dentro de um intervalo de confiabilidade.
- **Compleitude:** verifica se em caso de ocorrência de múltiplas soluções possíveis conhecidas para o problema, o modelo heurístico pode encontrar todas.

Devido sua natureza combinatorial, problemas de otimização são classificados como NP-difícil, devido sua alta complexidade e consumo de recursos, o que torna a busca por uma solução ótima impraticável por meio de métodos tradicionais, devido o tamanho exponencial do espaço de busca em soluções factíveis, justificando a aplicação de técnicas que entreguem soluções suficientemente boas para o problema (ALBA; LUQUE; NESMACHNOW, 2013). Nesse contexto, aplicam-se métodos heurísticos, abordagens que exploram a vizinhança em busca de potenciais soluções de maneira eficiente, com o auxílio de regras e critérios fundamentais que guiam a estratégia vigente.

2.2.1 Heurística Construtiva

São chamados de heurísticas construtivas os métodos que partem de uma solução vazia, e tem como proposta preenchê-la, por meio de instruções curtas e parâmetros que guiam o desenvolvimento reduzindo o espaço de possibilidades, buscando um resultado factível, embora nem sempre ótimo (KOULAMAS, 1998). Uma das técnicas mais comuns em heurísticas construtivas é o uso de algoritmos gulosos para, na qual o algoritmo implementado procura sempre o melhor resultado possível para a iteração (JR et al., 2008):

Algoritmo 1: Algoritmo guloso como exemplo de heurística construtiva

Entrada: Conjunto de elementos E , Critérios de seleção C

Saída: Solução aproximada

1 Inicialize a solução vazia S ;

2 **repita**

3 | Seleccione um elemento e de E com base em C ;

4 | Adicione e à solução S ;

5 **até** *Atender critério de parada*;

6 **retorna** *Solução aproximada*

2.2.2 Meta-heurística

São procedimentos de alto-nível que guiam procedimentos de busca aplicados à soluções já existentes em um sistema, de maneira aproximativa e não-determinística, afim de aprimorá-las e otimizá-las, explorando a vizinhança adjacente a encontrada em soluções iniciais de maneira iterativa, embora não haja garantia de encontrar um global ótimo para algumas classes de problemas (BLUM; ROLI, 2001).

Conforme observado por Bianchi et al. (2009), meta-heurísticas podem ser agrupadas por diversos parâmetros como observado na Figura 2.

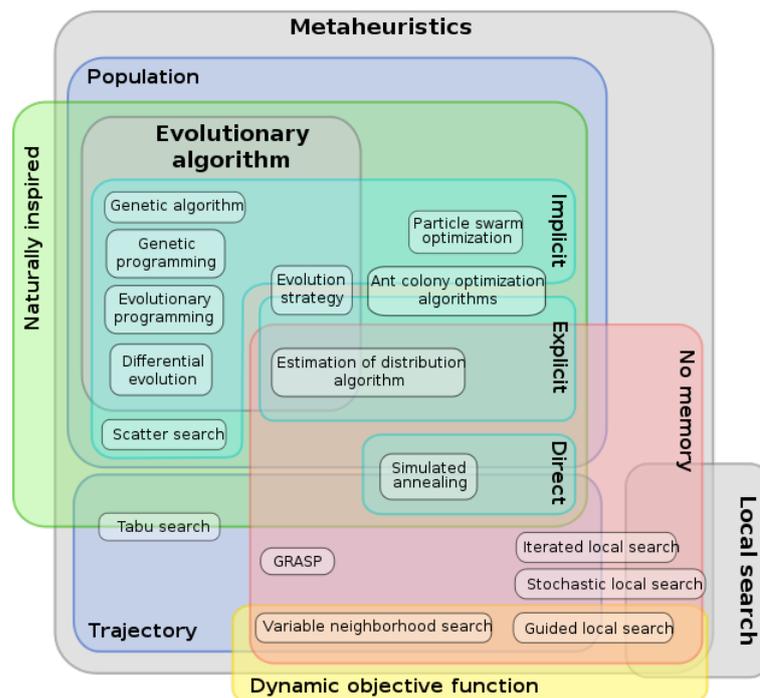


Figura 2 – Diagrama de classificação das principais meta-heurísticas.

Fonte: Ezugwu et al. (2021)

Algumas das principais propriedades para agrupamento de meta-heurísticas são:

- **Tamanho populacional:** essa propriedade verifica se a técnica implementada é guiada pela população gerada pela solução. Algumas heurísticas como *simulated annealing* e *variable local search* procuram melhorias em apenas uma solução (população de tamanho 1), enquanto outras técnicas como *algoritmos genéticos* ou *particle swarm optimization* se aproveitam de múltiplas populações de solução para realizar operações como cruzamento, mescla e mutações afim de gerar uma vizinhança completamente nova.
- **Busca Local vs. Busca Global:** essa propriedade verifica a estratégia implementada, observado se a técnica busca por uma solução local ótima na vizinhança, como *hill climbing* e *variable neighborhood search*, enquanto outras técnicas como *GRASP* e *busca tabu* tentam escapar da vizinhança local afim de obter soluções mais variadas. Em ambos os casos não há garantia de encontrar o global ótimo.

Uma das principais estratégias emergentes é a *fix-and-optimize*, uma busca **local** em populações de **tamanho único**, na qual o problema é decomposto em conjuntos menores, iterativamente fixando uma parcela do problema enquanto tenta realizar melhorias na outra (DORNELES; de Araújo; BURIOL, 2014). Na Figura 3, há um exemplo da estratégia *fix-and-optimize*, para um problema de programação de horários médicos, onde os médicos P_1 , P_2 e P_3 são alocados para os horários D_1 , D_2 , ..., D_{12} . A partir de uma solução inicial, pode-se fixar parte dela (na figura, os horários D_5 a D_{12}) e deixar livre uma parte da solução (no exemplo, os horários D_1 a D_4), onde a solução vai ser reotimizada.

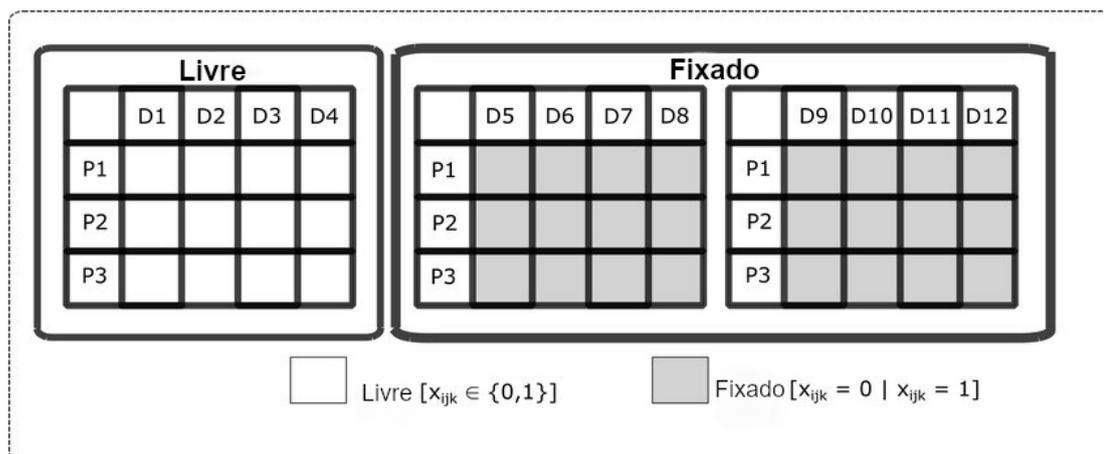


Figura 3 – Exemplificação do primeiro estágio do *fix-and-optimize*.
Fonte: Devesse, Santos e Toledo (2017)

2.3 Trabalhos Relacionados

Moreira, Colnago e Colombo (2019) traz em seu trabalho o desenvolvimento de um modelo matemático abrangente. Devido à natureza da instituição, semelhante à observada nesse mesmo trabalho, a quantidade de aulas por turma excede à quantidade de professores no campus, o que aumenta a carga horária dos docentes devido o empréstimo de professores para outros cursos. Com a inclusão de penalidades na função objetiva, ele tenta otimizar à grade de horários, reduzindo aulas em contra-turno de maneira que formem janelas esparsas de atividades, enquanto procura assegurar intervalos interjornadas, garantindo descanso e evitando sobrecarga para quem leciona ao estipular cargas horárias com limites diários. O modelo procura também, reduzir horários indesejados, evitando alocações de aulas aos sábados para turmas que disponham de horários semanais igual ou excedentes à carga horária da disciplina.

Similarmente, Rudová e Murray (2003) implementam uma solução computacional em Prolog por meio de Programação Linear por Restrições (ou *Constraint Linear Programming*, abreviado de CLP) que procura gerar horários de aulas em um contexto de PPHPM, e conta com uma relaxação fixa à nível de modelo institucional, onde a universidade conta com mais horas aulas disponíveis para dias específicos da semana, como quartas e sextas, que possuem aulas com duração 1,5 vez menor que as demais da semana, com base na preferência dos professores, por meio de restrições leves que permitem penalização da solução gerada, integrando parâmetros individuais de cada docente, como preferência por horários ou condensados ou janelas, preferência por primeiros ou últimos horários do dia. O algoritmo desenvolvido atua em dois estágios distintos, o primeiro realizando uma busca inicial guiada por diferentes estratégias como *first-fail*, e agregando os valores mais relevantes as buscas de reparo, que tem por finalidade refinar o resultado obtido.

3 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

O Campus Rio Verde faz parte do Instituto Federal Goiano, e portanto, possui diversos cursos regulares ofertados: cursos técnicos de grau médio; PROEJA; tecnólogos; graduações em nível superior; pós-graduações e especializações. Semestralmente, é feita a programação do quadro de horários das disciplinas de todos os cursos regulares, considerando os professores, as salas de aula, os laboratórios e outros recursos. Por conta da quantidade de disciplinas, turmas, professores e salas, há uma explosão combinatorial do tamanho do problema, que possui um grande volume de dados, variáveis de decisão e restrições. O quadro de horários possui duração igual para todos os cursos e portanto é desenvolvido em período entre-semestres, sendo realizado ao mesmo tempo para todas as turmas.

A Tabela 2 clarifica o contexto trabalhado e suas proporções, principalmente no que se refere a quantidade de turmas.

Tabela 2 – Cursos ofertados pelo IFGoiano - campus Rio Verde em 2021

Nome do curso	Grau de formação	Turno	Nº. de turmas
Administração	Superior	Noturno	4
Agronomia	Superior	Integral	5
Ciência da Computação	Superior	Integral	4
Ciências Biológicas (bacharelado)	Superior	Integral	4
Ciências Biológicas (licenciatura)	Superior	Noturno	4
Engenharia Ambiental	Superior	Integral	5
Engenharia de Alimentos	Superior	Integral	5
Engenharia Civil	Superior	Integral	5
Engenharia Química	Superior	Integral	5
Química	Superior	Noturno	4
Zootecnia	Superior	Integral	4
Agronegócio	Tecnólogo	Integral	3
Saneamento Ambiental	Tecnólogo	Integral	3
Técnico em Administração	Técnico	Noturno	2
Técnico em Agropecuária	Técnico	Integral	2
Técnico em Alimentos	Técnico	Noturno	2
Técnico em Biotecnologia	Técnico	Noturno	2
Técnico em Contabilidade	Técnico	Noturno	2
Técnico em Edificações	Técnico	Noturno	2
Técnico em Informática	Técnico	Noturno	2
Técnico em Química	Técnico	Noturno	2
Técnico em Segurança do Trabalho	Técnico	Noturno	2
PROEJA Administração	Médio	Integral	3
PROEJA Edificações	Médio	Integral	3
Total de turmas			77

Fonte: Próprio Autor (2023)

No Campus Rio Verde, são considerados dias letivos um conjunto de 6 dias, iniciando na segunda-feira e encerrando no sábado, embora esse último dia seja destinado majoritariamente à disciplinas de pós-graduação, atividades de campo, aulas *online*, ou, em casos mais extremos, aulas que não puderam ser alocadas durante a semana. Há 16 horários diários disponíveis $T = \{1, 2, \dots, 16\}$, com duração de 50 minutos cada, correspondendo à uma hora-aula, começando às 07:30 e encerrando às 22:20, com alguns intervalos de tempo entre algumas das aulas. Os turnos matutino, vespertino e noturno são dados pelos conjuntos de horários $\{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$, os vespertinos, $\{7, 8, 9, 10, 11, 12\}$, e noturnos, $\{13, 14, 15, 16\}$. No sábado, as atividades presenciais se encerram ao fim do período vespertino ($T = \{1, 2, \dots, 12\}$). As turmas com ciclos diurnos intercalam os horários para flexibilização de recursos (normalmente turmas com ingresso em anos ímpares são alocadas para o período da manhã e turmas com ingresso em anos pares para o período vespertino).

Como há um número de salas suficientes para todos os turnos, o ensalamento realizado pela diretoria de ensino considera uma sala de aula por turma. Desconsidera-se inicialmente a questão do uso de laboratórios de informática e de outras áreas para o quadro de horários das disciplinas.

Além disso, deve se levar em conta a carga horária estendida dos professores em Institutos Federais, em detrimento a carga horária em universidades, exaustivamente exemplificada nas diversas pesquisas acadêmicas da área de PPHU; e, embora a classe de problemas mencionada trate de programação de quadros para universidades, o Instituto Federal Goiano funciona de maneira similar a instituições universitárias.

Para ser considerado viável, o modelo deve atender o seguinte conjunto de restrições:

1. Um professor não pode ministrar mais de uma disciplina no mesmo horário e dia;
2. Uma turma não pode ter aulas de mais de uma disciplina no mesmo horário e dia;
3. Todos os agentes (professores e turmas) devem ter as seus encontros alocados para os dias e turnos de disponibilidade;
4. Uma disciplina deve ter exatamente a quantidade de horas-aula especificada em sua carga horária;
5. Os horários de início e fim das aulas em cada turno são pré-definidos, sendo 6 horários no turno matutino, 6 horários no período vespertino e 4 horários no período noturno, e a alocação das disciplinas, deve portanto, respeitar esses intervalos.

Existem também alguns pontos a serem destacados, que, embora não sejam restrições fortes, ajudam a formular penalidades para o modelo e guiar a solução. São eles:

1. Há preferência pela redução de horários de aula indesejados como sextos horários (no período matutino e vespertino) e aulas aos sábados;
2. Embora não computado pelo modelo, é preferível alocar as porções EaD de uma ou várias disciplinas no sábado (mesma política do sistema usado atualmente pela direção de ensino);
3. Existe uma certa preferência por reduzir janelas de horário dos professores, quando em um mesmo turno o docente ministra uma aula, possui um tempo livre e no mesmo turno possui outra aula.
4. Devido a disponibilidade de salas em relação a quantidade de turmas nos turnos, as turmas normalmente são fixas à uma sala ou conjunto de salas de um bloco, ou até mesmo fixando determinadas disciplinas que demandem certos recursos para salas específicas, resolvendo o problema de ensalamento de forma mais simples.

Afim de padronizar a estratégia de solução para o problema exposto, foi preferido agir com unanimidade acerca da redução de janelas, tratando então a preferência de todos os professores por igual, e buscando reduzir o número de janelas de aula para todo o corpo docente.

4 Materiais e Métodos

O trabalho inicialmente tinha como proposta a implementação de um modelo matemático que seria utilizado executado em um *solver* comercial. A ideia no entanto foi descartada em detrimento a criação de uma estratégia computacional guiada por heurísticas, podendo assim ser executado como um programa próprio, sem a necessidade de um *software* terceirizado.

A aplicação computacional têm por finalidade gerar uma única solução, sendo esta composta pelos quadros de horário de todos os professores e turmas da instância à ser solucionada. A métrica utilizada para quantificar a qualidade do resultado é a minimização de encontros indesejados presentes nas agendas. Esses encontros são:

- **Sextos Horários:** todos os eventos que ocorrerem no último horário do turno da manhã (índice 6) e da tarde (índice 12) serão contabilizados nessa classe;
- **Finais de Semana:** todos as aulas **presenciais** que ocorrerem em qualquer um dos horários do sábado, independente do turno, serão contabilizados aqui;
- **Buraco no turno:** essa classe contabiliza a não ocorrência de aulas subsequentes para um professor em um mesmo turno.

	Turno 1						Turno 2						
	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8	H9	H10	H11	H12	
SEG	D1	D1		D2	D2								- 1 janela
TER			D3	D3			D4	D4					- 0 janelas
QUA									D5	D5			- 0 janelas
QUI	D6		D6					D7			D7		- 3 janelas
SEX	D8											D9	- 0 janelas

Figura 4 – Exemplo de janelas na agenda de um professor qualquer
Próprio Autor (2023)

Nesta seção será discutido o desenvolvimento da solução implementada ao longo da pesquisa, bem como suas metodologias, e evolução da estratégia aplicada.

4.1 Modelo Matemático

Embora não utilizado método de solução final do trabalho proposto, o modelo matemático não pode ser descartado, pois serve como guia para a função objetivo buscada, bem como um plano para observação dos parâmetros à serem tratados na instância. Primeiramente, definimos quais dados serão considerados e a forma que serão trabalhados. Por se tratar de um problema de programação de horários, é importante destacar que os eventos (disciplinas) devem ser obrigatoriamente alocados nos quadros de horário dos agentes (turmas e professores) relacionados.

A tabela 3 mostra os conjuntos e parâmetros unidimensionais (vetores) do sistema:

Tabela 3 – Conjuntos e parâmetros do problema

Simbologia	Descrição
Q	disciplinas disponíveis (índice q)
P	professores em atividade (índice p)
G	turmas matriculadas (índice g)
D	dias letivos da semana (índice d)
T	horários disponíveis no dia (índice t)
TR	turnos disponíveis: {manhã, tarde, noite}
Ch_q	Carga horária semanal da disciplina q
$Chmin_q$	Carga horária mínima diária da disciplina q

Fonte: Próprio Autor (2023)

As disciplinas possuem uma carga horária semanal a ser cumprida em um número desejável de encontros, com uma carga horária mínima por encontro. Por exemplo, podemos indicar que uma disciplina de 6 horas-aula por semana possui encontros de no mínimo 2 horas-aula e que deseja-se 3 encontros. O melhor cenário, seria a disciplina ter 3 encontros de 2 horas-aula na semana. Entretanto, há à possibilidade de 2 encontros de 3 horas-aula cada, ou 2 encontros sendo um de 2 horas-aula e um de 4 horas-aula ou mesmo 1 encontro de 6 horas-aula não são descartados, podendo gerar uma solução de maior complexidade, e eventualmente, infactibilidade.

As duplas (d,t) definem o dia d e horário t de forma conjunta. Os conjuntos DT estão sujeitos às indisponibilidades do professor, da turma, da sala ou da própria disciplina. Por exemplo, para uma turma de um curso noturno, podem não ser considerados horários diurnos de segunda a sexta e horários matutinos no sábado (embora evitados). Outro exemplo é um professor que está a fazer pós graduação lato sensu nas sextas-feiras e sábados, e possui tais horários indisponíveis.

A tabela 4 demonstra as relações sistêmicas por meio de parâmetros unidimensionais (vetores) e multidimensionais (matrizes):

Tabela 4 – Relacionamentos de conjuntos

Simbologia	Descrição
Q_p	relação de disciplinas do professor
Q_g	relação de disciplinas da turma
P_q	relação de professores da disciplina;
G_q	relação de turmas da disciplina
DT	pares horário-dia $(d,t) \in D \times T$
DTI	pares horário-dia indesejados $(d,t) \in DT$
DT_p	pares horário-dia $(d,t) \in DT$ disponíveis do professor $p \in P$
DT_g	pares horário-dia $(d,t) \in DT$ disponíveis da turma $g \in G$
DT_q	pares horário-dia $(d,t) \in DT$ disponíveis da disciplina $q \in Q$, já absorvidos os horários disponíveis dos professores P_q e os horários disponíveis das turmas G_q
$DT_{d,tr}$	pares de horário-dia $(d,t) \in DT$ do dia d e turno tr disponíveis.

Fonte: Próprio Autor (2023)

As variáveis apresentadas na tabela 5 seguir têm por finalidade decidir e armazenar dados do modelo:

Tabela 5 – Variáveis do sistema matemático proposto

Simbologia	Descrição
X_{qdt}	Verifica se disciplina q foi alocada para par (d,t)
XC_{qdt}	Indica que a disciplina q está alocada para os horários consecutivos (d,t) e $(d,t + 1)$
Y_{qd}	Indica que a disciplina q teve algum horário alocado para o dia d
Z_{pd}	Indica que o professor p teve alguma disciplina alocada no dia d
ZC_{pdt}	Indica que o professor p foi alocado para os horários consecutivos (d,t) e $(d,t + 1)$
$ZJ_{pd,tr}$	Indica que o professor p teve janelas no dia d e no turno tr

Fonte: Próprio Autor (2023)

Dessa forma, podemos formular o seguinte modelo matemático de programação linear inteira mista:

A função objetivo 1 procura, na primeira parcela, reduzir a quantidade de ocorrências de horários indesejados, verificando a ocorrência de eventos nos pares $D \times T$, enquanto a segunda parcela procura reduzir a ocorrência de janelas. Os fatores λ e $(1 - \lambda)$ representam pesos para cada objetivo.

$$\text{Minimizar } \lambda \sum_{q \in Q} \sum_{(d,t) \in DTI} X_{qdt} + (1 - \lambda) \sum_{p \in P} \sum_{d \in D} \sum_{tr \in TR} Z_{J_{pd,tr}} \quad (1)$$

A restrição (2) estabelece que a carga horária semanal alocada para cada disciplina deve ser igual à carga horária exigida pela disciplina, enquanto a restrição (3) é responsável por limitar as decisões de horário das disciplinas de acordo com as indisponibilidades previamente determinadas para disciplinas, professores e turmas.

$$\sum_{(d,t) \in DT_q} X_{qdt} = Ch_q, \quad \forall q \in Q \quad (2)$$

$$X_{qdt} = 0, \quad \forall q \in Q, (d,t) \in DT - DT_q \quad (3)$$

As restrições (4) são aplicadas para evitar choques de horário entre disciplinas pertencentes à mesma turma. As restrições (5) e (6) evitam choques de horário entre disciplinas lecionadas pelo mesmo professor e estabelecem a variável auxiliar Z_{pd} , que indica se um professor p ministra aulas no dia d .

$$\sum_{q \in Q_g} X_{qdt} \leq 1, \quad \forall g \in G, (d,t) \in DT_g \quad (4)$$

$$\sum_{q \in Q_p} X_{qdt} \leq Z_{pd}, \quad \forall p \in P, (d,t) \in DT_p \quad (5)$$

$$Z_{pd} \leq \sum_{q \in Q_p} \sum_{(d,t) \in DT_q} X_{qdt}, \quad \forall p \in P, d \in D \quad (6)$$

A variável auxiliar Y_{qd} indica se algum horário foi alocado para a disciplina q no dia d . Essa informação é obtida no modelo por meio das equações (7) e (8), que estabelecem a relação entre as variáveis X_{qdt} e Y_{qd} . Além disso, a restrição (8) impõe que cada disciplina q deve atender a uma carga horária mínima em cada dia d em que é alocada.

$$X_{qdt} \leq Y_{qd}, \quad \forall q \in Q, (d,t) \in DT \quad (7)$$

$$\sum_{(d,t) \in DT_q} X_{qdt} \geq Chmin_q Y_{qd}, \quad \forall q \in Q, d \in D \quad (8)$$

As restrições (9) têm o propósito de garantir que as aulas das turmas ocorram mais cedo no turno da turma, evitando assim janelas sem aulas durante o dia.

$$\sum_{q \in Q_g} X_{qdt} \geq \sum_{q \in Q_g} X_{qd,t+1}, \quad \forall g \in G, (d,t) \text{ e } (d,t+1) \in DT_g \quad (9)$$

As restrições (10) a (14) determinam que as aulas de uma mesma disciplina, ministradas no mesmo dia/turno para uma mesma turma, devem possuir horários consecutivos.

$$X_{qdt} + X_{qd,t+1} \leq Y_{qd} + XC_{qdt}, \quad \forall q \in Q, (d,t) \text{ e } (d,t+1) \in DT_q \quad (10)$$

$$XC_{qdt} \leq X_{qdt}, \quad \forall q \in Q, (d,t) \text{ e } (d,t+1) \in DT_q \quad (11)$$

$$XC_{qdt} \leq X_{qd,t+1}, \quad \forall q \in Q, (d,t) \text{ e } (d,t+1) \in DT_q \quad (12)$$

$$XC_{qdt} = 0, \quad \forall q \in Q, (d,t) \in DT_q \text{ e } (d,t+1) \notin DT_q \quad (13)$$

$$\sum_{(d,t) \in DT_q} (X_{qdt} - XC_{qdt}) = Y_{qd}, \quad \forall q \in Q, d \in D \quad (14)$$

As restrições (15) a (19) determinam os horários consecutivos do professor ZC_{pdt} , e com isso conseguem detectar janelas de horários $ZJ_{pd,tr}$ do professor p em dias d e turnos tr . Lembrando, a janela ocorre quando um professor dá aula em um horário do turno e volta a dar aula no mesmo turno, após não dar aula em um horário no mesmo turno.

$$\sum_{q \in Q_p} X_{qdt} + \sum_{q \in Q_p} X_{qd,t+1} \leq Z_{pd} + ZC_{pdt}, \quad \forall p \in P, (d,t) \text{ e } (d,t+1) \in DT_p \quad (15)$$

$$ZC_{pdt} \leq \sum_{q \in Q_p} X_{qdt}, \quad \forall p \in P, (d,t) \text{ e } (d,t+1) \in DT_p \quad (16)$$

$$ZC_{pdt} \leq \sum_{q \in Q_p} X_{qd,t+1}, \quad \forall p \in P, (d,t) \text{ e } (d,t+1) \in DT_p \quad (17)$$

$$ZC_{pdt} = 0, \quad \forall p \in P, (d,t) \in DT_p \text{ e } (d,t+1) \notin DT_p \quad (18)$$

$$\sum_{q \in Q_p} \sum_{(d,t) \in DT_{d,tr}} X_{qdt} \leq Z_{pd} + ZJ_{pd} + \sum_{(d,t) \in DT_{d,tr}} ZC_{pdt}, \quad \forall p \in P, d \in D, tr \in TR \quad (19)$$

Por fim, as restrições de domínio das variáveis de decisão:

$$X_{qdt}, XC_{qdt}, Y_{qd} \in \{0,1\}, \quad \forall q \in Q, d \in D, t \in T \quad (20)$$

$$Z_{pd}, ZC_{pdt} \in \{0,1\}, \quad \forall p \in P, d \in D, t \in T \quad (21)$$

$$ZJ_{pd,tr} \in \{0,1\}, \quad \forall p \in P, d \in D, tr \in TR \quad (22)$$

4.2 Solução Computacional

Foi optado ao decorrer do projeto relevar o uso do modelo matemático para cerne da solução, por meio de *softwares* pagos como CPLEX ou LINGO, em detrimento à criação de uma aplicação computacional criada do zero, afim de corroborar com a proposta de uma ferramenta de baixo custo para a instituição, afim de reduzir gastos em sistemas terceirizados. Como principal motivador a linguagem C++, o utilitário realiza a leitura da instância à ser trabalhada por meio de planilhas *templates* contendo dados necessários para a aplicação (lista de disciplinas, professores, turmas e cursos).

Embora seja empregada a solução computacional própria, fez-se proveito do modelo matemático proposto previamente como guia de desenvolvimento, principalmente no que remete à função objetivo, como a busca por redução de janelas em dias letivos para os professores, e horários indesejados como sextos horários e sábados nos quadros das turmas.

Tendo como principais motivadores as linguagens C++ como *engine* para solução e Python para instanciamento e normalização dos arquivos de entrada, que foram criados utilizando editores de planilha, pré-formatando-as, como observado na figura 6, criam-se

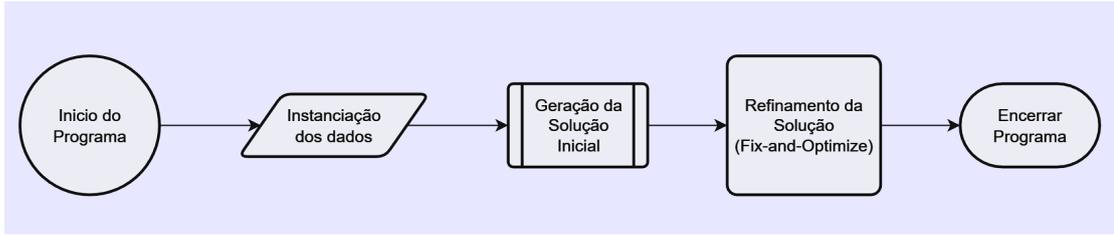


Figura 5 – Diagrama de execução do programa.
 Fonte: Próprio Autor (2023)

as instâncias que serão avaliadas ao decorrer do problema relacionaria informações como professores por disciplina e disciplinas por turma. Essa tabela seria então particionada em diferentes documentos CSV pelo algoritmo em Python.

C2 | fx =JOIN("",";FILTER(Disciplinas!A:A; regexmatch(Disciplinas!D:D; B2)))

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	ID	Professores	Disciplinas	SEG	TER	QUA	QUI	SEX	SAB
2	PROF.1	FRANCIELLE FERREIRA DE FREITAS	137689, 137686, 137690, 137685, 132891, 132888	0	0	0	0	0	0
3	PROF.2	ADEMIR XAVIER DE SOUZA	137684, 137688, 132890, 132886, 132887, 132889	0	0	0	0	0	0
4	PROF.3	FREDERICO DE MORAIS BORGES	137687, 132892	0	0	0	0	0	0
5	PROF.4	WILCIENE NUNES DO VALE	132678, 132685, 132796, 132832, 132709	0	0	0	0	0	0
6	PROF.5	BRUNNA DIAS CARDOSO	132675, 132682, 132794, 132791, 132801, 132809, 133309, 133317, 132846	0	0	0	0	0	0
7	PROF.6	HAIHANI SILVA PASSOS	132673, 132842	0	0	0	0	0	0
8	PROF.7	ROBERTO EDUARDO CASTILLO PIZARRO	132679, 132686, 133215, 133234	0	0	0	0	0	0
9	PROF.8	MILTON BERNARDES FERREIRA	132676, 132683, 133173, 132825, 132860	0	0	0	0	0	0
10	PROF.9	FERNANDO AUGUSTO GOMES DE MORAES	132677, 132684, 133171, 132802, 132707, 133238	0	0	0	0	0	0
11	PROF.10	MÁRCIA CRISTINA PUYDINGER DE FAZIO	132674, 132681, 132831, 132705, 132722, 133194, 132851	0	0	0	0	0	0

+ ≡ Disciplinas Professores Cursos Turmas Salas

Figura 6 – Exemplo da planilha gerada para instanciação do problema.
 Fonte: Próprio Autor (2023)

4.2.1 Heurística Construtiva

Após processamento inicial dos arquivos, geradas as classes em C++ e criado o relacionamento de objetos, têm-se uma instância computacional completa, que será processada afim de gerar uma possível solução. Por padrão, o sistema desenvolvido gera um número pre-definido de populações de uma mesma instância, definidos no início do programa pelo parâmetro de entrada **Tamanho da População**. Essas populações são inicializadas com solução zero, isto é, a solução vazia, sem alocação de recursos, para em seguida iterar pela população gerada uma única vez cada possível solução.

O primeiro passo da aplicação, ao iterar pelo elemento da lista de soluções, é gerar uma solução inicial suficientemente boa, isto é, que tenha a maioria de suas disciplinas alocadas, respeitando a indisponibilidade inicial e regras impostas, para que possa eventualmente ser melhorada. Para obter tal resultado, utiliza-se a função *Inserir Inicio*, observada no algoritmo 3, que procura alocar as disciplinas da lista no horário mais cedo possível disponível, em um dia aleatório da semana, começando na segunda e encerrando no sábado, embora este último tenha menor prioridade para alocação. A ideia parte do pressuposto de que uma boa escolha desta lista de prioridade permite a construção de uma boa solução para a programação dos horários.

Para auxiliar a evolução do algoritmo, foi utilizada a estratégia de *splits*, tradução livre de divisões ou quebras da quantidade total de horas-aula semanal da disciplina em porções menores. Essas porções são definidas no início do programa pelo usuário ao realizar o preenchimento da planilha de entrada, na seção de disciplinas.

Para obter o *split* da disciplina, realiza-se o cálculo $Split = \lfloor \frac{CH}{Min} \rfloor$, onde o numerador representa a quantidade total de horas-aula da disciplina durante a semana, e o denominador representa a quantidade mínima de horas-aula sugerida para ser alocada. Ambos os valores são informados arbitrariamente pelo usuário na etapa de instanciação do problema.

A figura 7 exemplifica a divisão de porções para uma disciplina qualquer de carga horária semanal (CH) igual à 6. Nesse exemplo é possível observar que, caso o mínimo especificado resulte em uma fração com resto diferente de zero ($CH \not\equiv 0 \pmod{Min}$) a planilha arredonda a disciplina para uma parcela única, realizando todas as aulas de maneira subsequente.

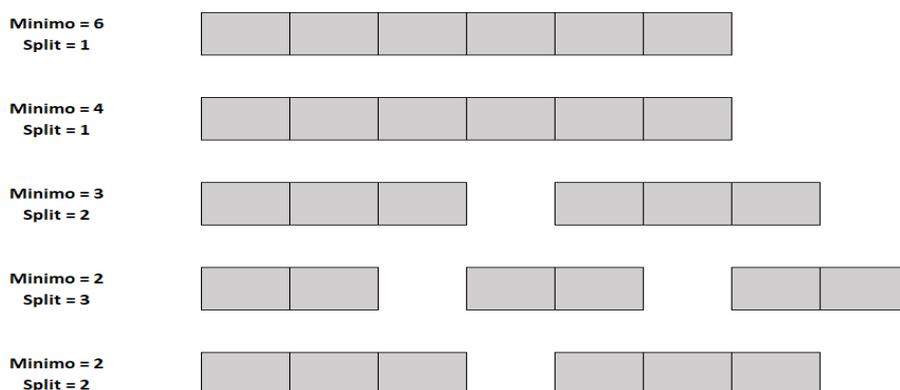


Figura 7 – Exemplificação do conceito de **splits** e carga mínima
Próprio Autor (2023)

Este procedimento respeita a carga horária de aulas e a carga horária mínima por encontro, buscando reduzir a quantidade de janelas de aulas, reduzir o uso de horários indesejados e alocar encontros conforme estipulado.

Ao longo da evolução do trabalho observou-se uma relação direta na qualidade da solução nesta etapa com a ordenação das disciplinas em lista para a função *Inserir Inicio*, e portanto, os seguintes critérios foram selecionados como método de organização:

- **Maior Carga Horária Mínima:** as disciplinas com maior carga horária mínima, isto é, a razão entre a carga horária total e a quantidade de *splits*, são alocadas no começo da lista, em ordem decrescente.
- **Menos Splits:** As disciplinas que não podem ser divididas, isto é, seus horários são obrigatoriamente subsequentes, são alocadas para o começo da lista, em ordem crescente;
- **Combinada:** Nesse critério realiza-se as disciplinas com maior carga horária mínima e menos *splits* são alocadas, respectivamente, são alocadas para o começo da lista;
- **Aleatório:** A lista é ordenada aleatoriamente.

Algoritmo 2: Ordenar Disciplinas

Entrada: Lista de disciplinas D

```

1 selecione  $Rand(1,4)$  faça
2   | caso 1 faça
3   |   Ordenar  $D$  da maior carga horaria para a menor;
4   | fim
5   | caso 2 faça
6   |   Ordenar  $D$  do menor split para o maior;
7   | fim
8   | caso 3 faça
9   |   Ordenar  $D$  da maior carga horaria para a menor;
10  |   Ordenar  $D$  do menor split para o maior;
11  | fim
12  | caso 4 faça
13  |   Aleatorizar a lista de disciplinas  $D$ ;
14  | fim
15 fim
16 retorna  $D^*$ 

```

É importante salientar que, não há garantia de que a solução obtida nessa etapa seja factível, pois existe a possibilidade de algumas disciplinas da lista não serem alocadas, dada a probabilidade de uma ordenação não favorável, onde disciplinas com muitos *splits* possam ser alocadas aleatoriamente pela semana, de maneira que não haja espaço para eventos onde não há possibilidade de quebra em *splits* menores.

Algoritmo 3: Inserir Início

Entrada: Lista de disciplinas D

```

1  $l \leftarrow$  tamanho de  $D * 2$ ;
2 enquanto  $l \geq 0$  ou houver disciplinas em  $D$  faça
3   |  $d \leftarrow$  último elemento de  $D$ ;
4   | enquanto  $d$  não for alocada faça
5   |   |  $i \leftarrow$  dia aleatório da semana;
6   |   | se Verifica_Disponibilidade( $i, d$ ) for verdadeiro então
7   |   |   | Remover  $d$  da lista  $D$ ;
8   |   |   |  $l \leftarrow l - 1$ ;
9   |   | fim
10  |   | senão
11  |   |   |  $l \leftarrow l - 1$ ;
12  |   | fim
13  | fim
14 fim
15 retorna  $S$ 

```

A sequência de instruções apresentada no algoritmo 3 realizara a inserção do elemento disciplina em um horário factível para a turma, professor e curso, uma vez que a função que verifica a disponibilidade do par *horrio* \times *dia* (linha 8) sempre leva em conta horários demarcados como indisponíveis durante a geração da instância, ou a presença de outro elemento já inserido na matriz de horário de algum dos agentes citados.

O bloco responsável pela verificação de disponibilidade pode ser expandido para o

algoritmo 4.

Algoritmo 4: Verificar Disponibilidade

Entrada: Dia i , Disciplina d

```

1 para  $h \in \text{Horários letivos}$  faça
2   | Verificar possibilidade de alocação para a turma e professor;
3   | se Inserção bem-sucedida então
4   |   | retorna Verdadeiro
5   |   fim
6 fim
7 retorna Falso

```

Afim de evitar um possível erro lógico onde o código se repetiria infinitamente devido a impossibilidade de inserir uma disciplina d no quadro dos agentes relacionados, faz-se o uso de uma condicional que verifica se o algoritmo foi iterado l vezes, sendo esse valor o tamanho da lista de disciplinas em questão. Exceto em casos extremos, oriundos de uma lista D aleatoriamente, onde as disciplinas d ficariam dispostas no quadro de horários sem qualquer prioridade na inserção prévia, o algoritmo gera majoritariamente soluções factíveis.

4.2.2 Heurística de Melhoria

Em sequência ao passo intermediário, onde obtêm-se uma solução inicial completa (factível ou não) por meio da função de *Inserir Início*, o programa imediatamente tenta realizar o procedimento de refinamento do resultado através da estratégia heurística de *fix-and-optimize*, na qual um valor definido por parâmetro pré-inicialização indica a quantidade de turmas de um mesmo curso que serão desafixadas, ou seja, terão seus quadros de horários simultaneamente destruídos, juntamente com o quadro de horário dos professores para as disciplinas relacionadas, afim de passarem por uma busca local que procura otimizar o resultado já obtido. Como um parcela do curso sempre é fixa, e não terá sua agenda destruída, a técnica permite uma busca em vizinhança próxima, priorizando factibilidade.

Algoritmo 5: Fix-and-Optimize

Entrada: Solução S_0

Dados: B_h, B_t /* # Repetições, # de Turmas */

```

1  $S \leftarrow S_0$ ;
2 para  $c \in C$  faça
3   | enquanto Houver melhoria em S faça
4   |   |  $T \leftarrow \text{SelecionarTurmas}(c, B_t)$ ;
5   |   | para  $i \in 0, 1, \dots, B_h$  faça
6   |   |   |  $S^* \leftarrow S \text{ BuscaLocal}(T, S^*)$ ;
7   |   |   | se  $S^* \leq S$  então
8   |   |   |   |  $S \leftarrow S^*$ 
9   |   |   | fim
10  |   | fim
11  | fim
12 fim
13 retorna  $S$ 

```

É possível observar no algoritmo 5 o uso de pesos durante a execução do código. Esses valores são informados durante a fase de execução do código, passados como argumentos do parâmetro inicial, e tem por finalidade serem multiplicados à respectiva quantidade contabilizada de encontros indesejados. O sistema de pesos permite guiar o refinamento da solução, uma vez que possibilita priorizar a redução de apenas um dos tipos de encontro ou ambos os encontros.

O algoritmo 6 é responsável por encontrar as disciplinas das turmas selecionadas pelo *fix-and-optimize*, inserindo-as em uma lista, que será utilizada para encontrar os professores relacionados. Encontrados todos os agentes relacionados pelas disciplinas, é realizado o procedimento de destruição do quadro de horários, removendo da agenda apenas as disciplinas que estão na lista, evitando assim uma disciplina não pertencente à alguma das turmas seja removida do cronograma do professor e cause infactibilidade na solução. Em seguida a função Inserir Início (Algoritmo 3) é invocada novamente para alocar os eventos.

Algoritmo 6: Busca Local

Entrada: Turmas T , Solução S

```
1  $S^* \leftarrow S$ ;  
2 para  $t \in T$  faça  
3    $D^* \leftarrow$  Disciplinas  $\in t$ ;  
4    $P^* \leftarrow$  Professores relacionados as disciplinas;  
5   Desalocar Disciplinas da Turma e Professor;  
6    $S^* \leftarrow$  Inserir_Inicio( $D^*$ );  
7 fim  
8 retorna  $S^*$ 
```

5 Resultados e discussões

Nessa seção busca-se a compreensão e validação dos resultados obtidos ao decorrer do projeto, bom como a análise da evolução heurística ao longo do tempo.

É importante frisar que, para fins práticos, as instâncias foram selecionadas por grau de complexidade. Um dos aspectos para a seleção dos períodos de 2018 em diante é a quantidade de turmas, que cresceu em decorrência a abertura de novos cursos, bem como a expansão do corpo docente, que ocorreu não apenas pela adição de cursos, mas pela necessidade de complementar e compartimentalizar as áreas de ensino.

Foi optado por remover as instâncias que compreendem o período pandêmico do *Covid-19*, no qual a instituição adaptou-se para modalidade de ensino à distância, com relaxações na carga horária em decorrência da proposta de redução da carga horária síncrona de 80% para 60%, reduzindo à quantidade de encontros, bem como a liberdade da forma de ensino do tutor para com a turma. Por essa razão não se faz necessário o estudo e formulação de quadros de horário nesse período, justificando o descarte do mesmo.

A tabela 6 demonstra um comparativo entre a melhor solução obtida pelo programa; a solução média, obtida pela cálculo da média de todas os resultados obtidos em uma instância em específico; a pior solução encontrada pelo programa; bem como a solução original, ou seja, o quadro de horários que foi utilizado pela instituição naquele período (dados e horários disponibilizados pelo corpo administrativo do campus). É importante salientar que o quadro de horários originalmente usado pelo instituto são provenientes de um *software* específico para *timetabling*, e também não utiliza métodos exatos para resolução, mas sim técnicas heurísticas provenientes de *solvers* matemáticos.

A tabela agrupa os resultados de acordo com a instância (período letivo) vigente, juntamente da sua classificação. A coluna *# Repetições BL* exibe a quantidade iterações em que a busca local foi realizada para a mesma instância (ver linha 5 do algoritmo 5), enquanto a coluna *# Turmas BL* informa a quantidade de turmas do curso na qual foi realizado o refinamento (ver algoritmo 6). As colunas *Peso Janela* e *# Janelas* informam respectivamente o peso atribuído para o cálculo de janelas e a quantidade nominal de janelas contabilizadas nos resultados. A mesma lógica se aplica para as colunas *Peso Sextos e Fim de Semana*, *# Sextos* e *# Fim de Semana*.

A coluna *# Total Normalizado* exibe o resultado do somatório de encontros indesejados computados no resultado (*#Janelas + #Sextos + #FimdeSemana*), enquanto a coluna seguinte, *% Melhoria* informa a razão de melhoria observada pela norma do resultado avaliado em relação a norma do quadro de horários original.

$$Melhoria = \frac{\#Janelas_{novo} + \#Sextos_{novo} + \#FimdeSemana_{novo}}{\#Janelas_{original} + \#Sextos_{original} + \#FimdeSemana_{original}} * 100$$

Note que a melhoria da solução original não é calculada, pois não há motivos para comparar o resultado original com ele mesmo. Por fim é exibido o tempo gasto pelo programa para gerar o resultado, em segundos, contabilizado a partir do início da execução e encerrando a contagem do tempo ao encerramento aplicação. O tempo de execução da solução original trata-se de um valor estimado de acordo com relatos dos usuários do corpo administrativo, e seu valor exato não é relevante para a discussão.

Tabela 6 – Comparação dos resultados para todas as instâncias

Instância	Classificação	# Repetições BL	# Turmas BL	Peso Janela	# Janelas	Peso Sextos e Fim de Semana	# Sextos	# Fim de Semana	Total Normalizado	% Melhoria	Tempo (segundos)
2018/1	Melhor	10	Todas	5	1	2	18	0	19	57,89%	28,11
	Média	5	Dinâmico	2	2	2	40	0	42	26,19%	11,05
	Pior	1	1	5	4	5	73	0	77	14,29%	11,77
	Original	-	-	-	9	-	0	4	11	-	~ 60
2018/2	Melhor	10	Todas	2	1	5	16	0	17	105,88%	28,66
	Média	5	Todas	1	2	2	38	0	40	45,00%	11,93
	Pior	1	1	1	0	1	69	0	69	26,09%	1,96
	Original	-	-	-	1	-	0	17	18	-	~ 60
2019/1	Melhor	10	Dinâmico	5	0	5	21	0	21	176,19%	35,49
	Média	5	Dinâmico	5	3	2	45	0	48	77,08%	15,92
	Pior	1	1	2	6	1	77	0	83	44,58%	2,1
	Original	-	-	-	2	-	0	35	37	-	~ 60
2019/2	Melhor	10	Todas	5	0	2	8	0	8	1025,00%	30,47
	Média	5	Dinâmico	2	1	1	30	0	31	264,52%	12,84
	Pior	1	2	2	1	2	63	0	64	128,13%	1,86
	Original	-	-	-	2	-	45	35	82	-	~ 60
2022/1	Melhor	10	Dinâmico	5	0	2	2	0	2	4100,00%	19,86
	Média	5	Todas	5	1	1	15	0	16	512,50%	7,68
	Pior	1	1	5	0	5	39	0	39	210,26%	1,35
	Original	-	-	-	10	-	82	6	98	-	~ 60

Próprio Autor (2023)

5.1 Instância 2018/1

O primeiro período de 2018 é possivelmente a instância com menor complexidade observada no conjunto, visto que alguns cursos como Bacharelado em Administração e Engenharia Química ainda não era ofertados pela instituição. Conforme a tabela 6 aponta, a quantidade de sextos horários e janelas presentes na solução heurística é significativamente maior. O método proposto no entanto zerou completamente as aulas presentes nos finais de semana, independente do curso, o que torna um ponto positivo para o trabalho empenhado.

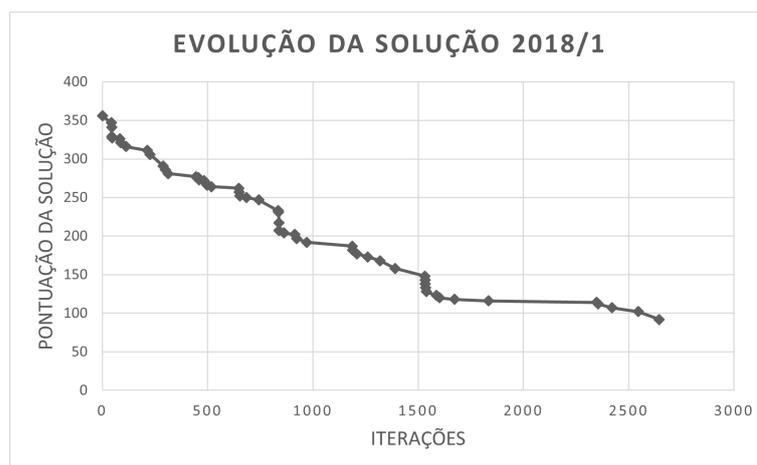


Figura 8 – Evolução da melhor solução em 2018/1
Fonte: Próprio Autor (2023)

Nessa instância, o parâmetro que gerou melhores resultados foi o uso de **uma única turma** na heurística de refinamento, e repetindo a mesma 10 vezes por turma, com **pesos 2 e 5 para janela e encontros indesejados (sextos horários e sábados)**, respectivamente. Analisando o gráfico de evolução da solução é possível observar melhorias na avaliação da solução à medida que turmas com mais componentes (professores partilhados e disciplinas) eram aplicadas à busca local. Conforme as janelas de professores eram reduzidas, e os cursos com mais componentes finalizados, a heurística estagna no ponto de convergência observado.

5.2 Instância 2018/2

A segunda metade de 2018 é marcada por cargas horárias maiores para as turmas em relação ao período anterior. Por essa razão verifica-se um aumento no uso de finais de semana para acomodar as aulas sem quebra de restrições. Nesse conjunto o modelo proposto obteve vantagem sobre a solução original no que se refere à norma da avaliação da solução. Novamente os parâmetros que rederam o melhor resultado para esse período foram a relação de **pesos 2 para janela e 5 para sextos horários**, afim de compensar a tendência do algoritmo de reduzir o primeiro. Na busca local para refinamento o critério de alocação dinâmica das turmas do curso, onde todas as turmas do curso são selecionadas em conjuntos incrementais obteve os melhores resultados. Foram realizadas **10 repetições** por busca para essa solução. Observa-se uma convergência mais cedo, próxima à 1500 iterações, logo após o refinamento dos cursos de graduação, especialmente os cursos de Engenharias e Agronomia, onde se observa melhorias mais acentuadas na pontuação.

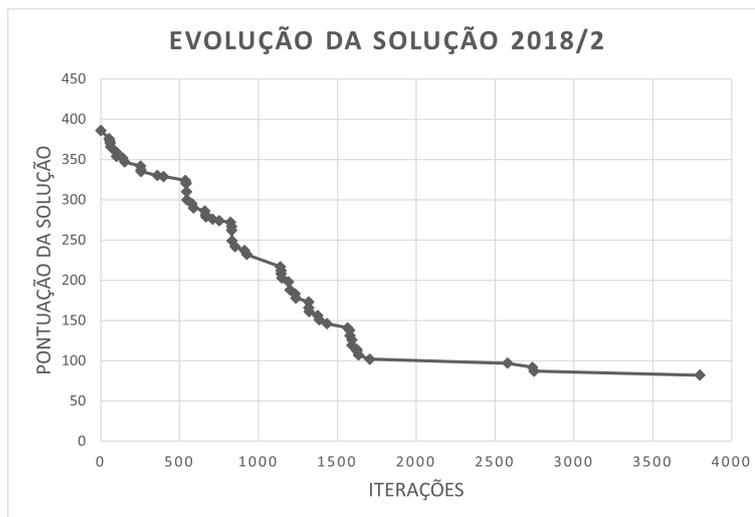


Figura 9 – Evolução da melhor solução em 2018/2
 Fonte: Próprio Autor (2023)

5.3 Instância 2019/1

Na primeira metade de 2019 a primeira turma de Bacharelado em Administração foi introduzido à instituição; e, por se tratar de um curso noturno com diversos professores partilhados dos cursos técnicos de Contabilidade e Administração, nota-se crescimento na complexidade da elaboração dos quadros, observada pelo crescimento em dobro na alocação de aulas aos finais de semana na solução original. Novamente, ao optar pelo uso dos sextos horários em detrimento aos sábados, foi possível obter uma solução consideravelmente melhor através do método heurístico com as métricas empenhadas. Nessa solução, os pesos utilizados para ambos os critérios de avaliação, janelas e encontros indesejados, foram 5. Observa-se que ao igualar os pesos, há uma tendência no aumento de sextos horários, em decorrência da minimização completa das janelas de professores. Novamente não houve uso de sábados para alocação de disciplinas. A busca local utilizou o método de **alocação dinâmica** e **10 repetições** por iteração. Observa-se novamente a convergência da solução a partir de 1500 iterações, ao final do refinamento dos cursos de graduação.

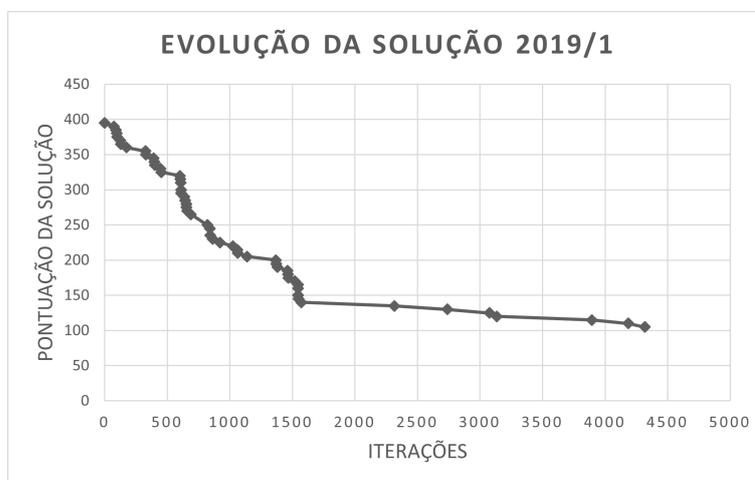


Figura 10 – Evolução da melhor solução em 2019/1
 Fonte: Próprio Autor (2023)

5.4 Instância 2019/2

Nesse período é possível observar uma melhoria significativa da solução metaheurística em relação à solução original da instituição. Com cerca de 10 vezes menos encontros indesejados, nota-se a possibilidade de melhor alocação dos recursos por meio da busca local, utilizando apenas 8 sextos horários para minimizar o uso de janelas e sábados. A solução de melhor resultado utilizou como parâmetros: pesos 5 para janelas e 2 para encontros indesejados, aplicando uma busca local por alocação dinâmica com 10 repetições por iteração.

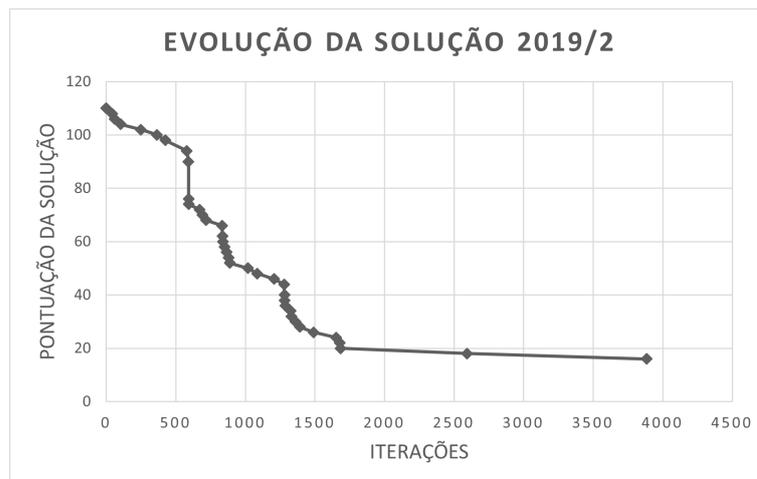


Figura 11 – Evolução da melhor solução em 2019/2
Fonte: Próprio Autor (2023)

5.5 Instância 2022/1

A partir desse período podemos verificar um decaimento na qualidade da solução original, ocasionada pela adição do curso de Engenharia Química em período integral, curso este que foi inaugurado em 2020, e nesse ano se encontrava em sua terceira turma. A solução original busca compensar o compartilhamento de professores entre os cursos de Engenharias e o curso de Licenciatura em Química aplicando mais sextos horários, visto que por consequências do retorno da pandemia, aulas aos finais de semana eram menos desejadas.

O método proposto nesse trabalho conseguiu redução significativa no uso de sextos horários, dada uma melhor alocação dos recursos, bem como a completa minimização de janelas e finais de semana, em tempo de execução baixo. Nessa solução, com pesos igualitários para janelas e encontros indesejados, pode-se afirmar a tendência do algoritmo em solucionar primeiramente as janelas, e após completamente sanadas, focar em reduzir os encontros em horários indesejados. Dessa forma a aplicação de pesos serve apenas como forma de restringir levemente a estratégia à não buscar soluções para os sextos horários.

Podemos observar também uma solução inicial com boa qualidade em relação aos anos anteriores, utilizando o método construtivo inicial aleatório para alocação das turmas. Novamente a heurística de refinamento obteve melhores resultados utilizando o método de alocação dinâmica de turmas por curso, além das 10 repetições por iteração da busca.

Outra vez é notável a convergência da solução por volta de um terço das iterações, logo após o final da melhoria em cursos de graduação, com quedas abruptas na pontuação

em cursos de Engenharia e Agronomia.

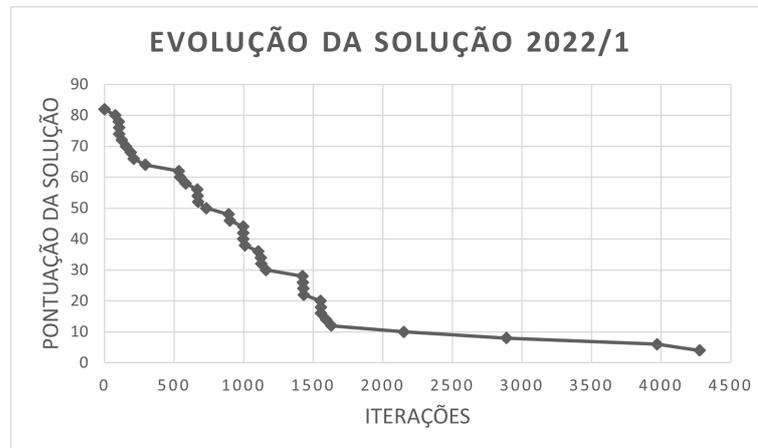


Figura 12 – Evolução da melhor solução em 2022/1
Fonte: Próprio Autor (2023)

5.6 Exemplo

Tomemos como exemplo prático do programa o quadro de horários do sétimo período de bacharelado em Ciência da Computação no ano de 2022. A turma possui 4 disciplinas ao todo, cada uma com professores distintos. As informações detalhadas das disciplinas obrigatórias ministradas para a turma nesse período específico, como carga horária e professor responsável, podem ser observadas na tabela 7:

Tabela 7 – Disciplinas ofertados pelo IFGoiano - campus Rio Verde em 2021

Disciplina	Professor	CH Total	CH Mínima
Pratica de Laboratório (TCC 1)	P1	3	3
Inteligência Artificial	P1	3	3
Sistemas Distribuídos	P2	3	3
Projeto de Software	P3	3	3

Fonte: Próprio Autor (2023)

Observa-se na figura 3 um grande condenamentos das disciplinas em apenas 2 dias da semana, o que gera uma grande dependência em sextos horários. Como as disciplinas não possuem possibilidade de *split*, isto é, quebra de horários em parcelas menores, uma vez que a carga horária total é igual a carga horária mínima; é realizar movimentações de blocos de horários para otimização do quadro em questão.

	H1	H2	H3	H4	H5	H6
SEG						
TER				D1	D1	D1
QUA	D2	D2	D2	D3	D3	D3
QUI	D4	D4	D4			
SEX						
SAB						

Figura 13 – Adaptação do horário original utilizado pela instituição no período.
Fonte: Próprio Autor (2023)

A solução gerada não apresenta sextos horários e janelas, devido a constante avaliação da função objetivo ao decorrer das iterações do resultado na busca local, visando sempre a redução de encontros indesejados no produto final. É possível notar também a priorização em alocar as disciplinas em dias aleatórios o mais cedo possível, gerando um quadro de horários com melhor distribuição de eventos.

	H1	H2	H3	H4	H5	H6
SEG	D1	D1	D1			
TER						
QUA	D2	D2	D2			
QUI	D4	D4	D4			
SEX	D3	D3	D3			
SAB						

Figura 14 – Quadro de horário otimizado obtido pela aplicação.
Fonte: Próprio Autor (2023)

6 Conclusões

A principal proposta para este trabalho era desenvolver uma aplicação computacional que englobasse técnicas comuns à Pesquisa Operacional afim de proporcionar uma alternativa à construção de horários ao Instituto Federal Goiano - campus Rio Verde, priorizando a redução de possíveis encontros indesejados e facilitando o trabalho do setor responsável na elaboração do plano letivo.

Observou-se melhoria significativa nos resultados obtidos durante a execução do trabalho, com uma taxa de redução de encontros indesejados relevante, principalmente para as turmas de cursos diurnos, onde há mais espaço para possíveis janelas e sextos horários. A possibilidade de personalizar a indisponibilidade dos agentes de antemão à geração da solução também facilita planejamento por parte do corpo administrativo da instituição.

Existem alguns contrapontos notáveis no entanto, como a tendência do algoritmo à reduzir janelas dos professores, mesmo que os pesos sejam propositalmente ajustados para priorizar sextos horários, o que pode causar ocorrência dos mesmos em diversas turmas. Esses sextos horários são majoritariamente causados pelo condenamento de janelas do professor, o que obriga o algoritmo à alocar aulas em horários mais tardios. Além disso, a função objetiva, embora aplicável, precisa de aditivos, como verificações no condenamento de dias para os discentes, ainda mais em turmas mais avançadas onde o estágio obrigatório é vigente em grande parte dos alunos. Dessa forma, permitir que a aplicação aloque encontros para um poucos dias da semana, independente dos sextos horários, livraria a semana dessas turmas.

É perceptível a necessidade de implementar pesos de preferência por parte do docente, onde o mesmo pode especificar a preferência por agendas mais esparsas ou enxutas ao decorrer da semana. Além disso, embora o instituto empregue cargas horárias mais longas ao professor do que o padrão em universidades, é desejável a criação de limitadores de carga horária diária. Por fim, o desenvolvimento de uma interface gráfica, bem como a refatoração do código, para que possa ser mais amigável ao usuário final é necessário caso o projeto evolua para ser realmente aplicado pelo pela equipe administrativa como alternativa ao *software* atualmente empregado.

Observa-se também possibilidades de melhoria na computação de *splits*, e no desenvolvimento de uma técnica heurística que force de maneira dinâmica a quebra de uma disciplina em parcelas menores, independente dos valores inseridos durante a instanciação.

Apesar dos diversos pontos de melhoria dissertados, conclui-se que o projeto atendeu as expectativas, fornecendo uma alternativa gratuita e viável ao sistema atualmente empregado na instituição.

Referências

- ABDULLAH, S. et al. A hybrid metaheuristic approach to the university course timetabling problem. *Journal of Heuristics*, v. 18, n. 1, p. 1–23, Feb 2012. ISSN 1572-9397. Citado na página 1.
- ALBA, E.; LUQUE, G.; NESMACHNOW, S. Parallel metaheuristics: Recent advances and new trends. *International Transactions in Operational Research*, v. 20, p. 1–48, 1 2013. ISSN 09696016. Citado na página 6.
- ARENALES, M. et al. *Pesquisa Operacional: Para cursos de engenharia*. Elsevier Brasil, 2015. ISBN 9788535281835. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=aZbpCgAAQBAJ>>. Citado 2 vezes nas páginas 1 e 4.
- BETTINELLI, A. et al. *An overview of curriculum-based course timetabling*. [S.l.: s.n.], 2015. v. 23. 313-349 p. ISSN 18638279. ISBN 1175001503641. Citado na página 5.
- BIANCHI, L. et al. A survey on metaheuristics for stochastic combinatorial optimization. *Natural Computing*, v. 8, p. 239–287, 2009. ISSN 15677818. Citado na página 6.
- BLUM, C.; ROLI, A. Metaheuristics in combinatorial optimization: Overview and conceptual comparison. *ACM Comput. Surv.*, v. 35, p. 268–308, 01 2001. Citado na página 6.
- BURKE, E. Automated University Timetabling: The State of the Art. *The Computer Journal*, v. 40, n. 9, p. 565–571, sep 1997. ISSN 0010-4620. Citado na página 1.
- De Werra, D. An introduction to timetabling. *European Journal of Operational Research*, v. 19, n. 2, p. 151–162, 1985. ISSN 0377-2217. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0377221785901675>>. Citado 2 vezes nas páginas 3 e 4.
- DEVESSE, V.; SANTOS, M.; TOLEDO, C. Fairness in physician scheduling problem in emergency rooms. v. 1, p. 12, 01 2017. Citado na página 8.
- DORNELES, A.; de Araújo, O.; BURIOL, L. A fix-and-optimize heuristic for the high school timetabling problem. *Computers & Operations Research*, v. 52, p. 29–38, 2014. ISSN 0305-0548. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305054814001816>>. Citado na página 7.
- EZUGWU, A. et al. Metaheuristics: a comprehensive overview and classification along with bibliometric analysis. *Artificial Intelligence Review*, Springer Science and Business Media B.V., v. 54, p. 4237–4316, 8 2021. ISSN 15737462. Citado na página 7.
- GASPERO, L. D.; SCHAERF, A.; MCCOLLUM, B. The second international timetabling competition (itc-2007): Curriculum-based course timetabling (track 3) — preliminary presentation —. *Association for the Advancement of Artificial Intelligence (www.aaai.org)*, p. 1–12, 2007. Citado na página 5.
- GOTLIEB, C. The construction of class-teacher time-tables. In: *IFIP Congress*. [S.l.: s.n.], 1962. Citado na página 3.

- GOZALI, A.; FUJIMURA, S. Solving university course timetabling problem using multi-depth genetic algorithm: Solving uctp using mdga. *SHS Web of Conferences*, v. 77, p. 01001, 01 2020. Citado na página 3.
- GROSS, J.; YELLEN, J.; ZHANG, P. *Handbook of Graph Theory, Second Edition*. 2nd. ed. [S.l.]: Chapman & Hall/CRC, 2013. ISBN 1439880182. Citado na página 3.
- JR, I. S. et al. Metodologia heurística construtiva para alocação de bancos de capacitores em sistemas de distribuição de energia elétrica. v. 19, p. 72–79, 3 2008. Citado na página 6.
- KIEFER, A.; HARTL, R.; SCHNELL, A. Adaptive large neighborhood search for the curriculum-based course timetabling problem. *Annals of Operations Research*, Springer US, v. 252, p. 255–282, 2017. ISSN 15729338. Citado na página 5.
- KOULAMAS, C. A new constructive heuristic for the flowshop scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, v. 105, n. 1, p. 66–71, February 1998. Disponível em: <<https://ideas.repec.org/a/eee/ejores/v105y1998i1p66-71.html>>. Citado na página 6.
- MOREIRA, J.; COLNAGO, G.; COLOMBO, J. Otimização de grade de horários de professores e disciplinas do ifsp - cbt: Refinamento das soluções por penalizações na função objetivo. *Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, p. 12, 2019. Citado na página 8.
- NEWELL, A.; SIMON, H. Computer science as empirical inquiry: symbols and search. *Commun. ACM*, v. 19, p. 113–126, 1976. Citado na página 5.
- PEARL, J. Heuristics: Intelligent search strategies for computer problem solving. 1 1984. Disponível em: <<https://www.osti.gov/biblio/5127296>>. Citado na página 5.
- PETROVIC, S.; BURKE, E. University timetabling. In: . [S.l.: s.n.], 2004. Citado na página 1.
- RASEONYANA, W.; ANDERSON, G.; NKG AU, T. Cost implications for an in-house university timetabling system. In: NJENGA, K. (Ed.). *Proceedings of 4th International Conference on the Internet, Cyber Security and Information Systems 2019*. EasyChair, 2019. (Kalpa Publications in Computing, v. 12), p. 281–289. ISSN 2515-1762. Disponível em: <<https://easychair.org/publications/paper/HXPD>>. Citado na página 2.
- REZAEIPANAH, A.; MATOORI, S.; AHMADI, G. A hybrid algorithm for the university course timetabling problem using the improved parallel genetic algorithm and local search. *Applied Intelligence*, v. 51, 01 2021. Citado na página 1.
- RUDOVÁ, H.; MURRAY, K. University course timetabling with soft constraints. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, v. 2740, p. 310–328, 2003. ISSN 16113349. Citado na página 8.
- SAVINIEC, L. *Models and algorithms for high school timetabling problems*. 157 p. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 1 2018. Citado na página 4.
- SCHAERF, A. A survey of automated timetabling. *Artificial Intelligence Review* 1999 13:2, Springer, v. 13, p. 87–127, 1999. ISSN 1573-7462. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1023/A:1006576209967>>. Citado na página 4.