LII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional
João Pessoa - PB, 3 a 5 de novembro de 2020

Atribuição de salas para disciplinas com demanda e horários fixos

Álvaro Junio Pereira Franco
Universidade Federal de Santa Catarina
Rua Delfino Conti, s/n, Trindade, Florianópolis - SC, 88040-370
alvaro.junio@ufsc.br

Gabriel Assunção Domene
Universidade Federal de Santa Catarina
Rod. Gov. Jorge Lacerda, 3201, Jardim das Avenidas, Araranguá - SC, 88906-072
gabriel.domene@grad.ufsc.br

Gabriel Estevam de Oliveira
Universidade Federal de Santa Catarina
Rod. Gov. Jorge Lacerda, 3201, Jardim das Avenidas, Araranguá - SC, 88906-072
gabriel.estevam@grad.ufsc.br

RESUMO

Apresentamos um sistema e um modelo de programação inteira para o problema da atribuição de salas com demandas e horários fixos de uma universidade. Resolvemos instâncias reais utilizando uma versão acadêmica de uma ferramenta de otimização. Os resultados obtidos são analisados e podem auxiliar funcionários da universidade em tomadas de decisões.

PALAVRAS CHAVE. O problema da atribuição de salas, universidade, experimentos.

PO na Administração Pública e Educação, PO em Telecomunicações e Sistemas de Informações, Programação Matemática

ABSTRACT

We present a system and an integer programming model for the classroom assignment problem with fixed demand and timetable af a university. We solve real instances using an academic version of an optimization tool. The obtained results are analyzed and they can support university employees to decision making.

KEYWORDS. The classroom assignment problem, university, experiments.

OR in Public Administration and Education, OR in Telecommunication and Information Systems, Mathematical Programming

Galoá { Este trabalho foi publicado utilizando o **Galoá** proceedings

Introdução

Atribuir salas para disciplinas é um problema comum em escolas e universidades. Pode acontecer que uma boa solução para o problema seja usada por muitos anos, com pequenos ajustes quando necessário para atender à demanda específica: uma sala já não serve mais para uma disciplina pois o professor que ministra tal disciplina precisa agora acessar conteúdo na internet; a sala atual para a turma é pequena porque o número de alunos aumentou; os alunos precisarão de computadores durante as aulas; uma sala está em reforma; etc. Quando o problema a ser tratado possui uma *escala pequena*, os ajustes necessários podem ser feitos manualmente de forma segura e rápida. Quando este não é o caso, um esforço grande normalmente é gasto para encontrar uma boa solução.

A nossa motivação para trabalhar com o problema da atribuição de salas teve início com uma conversa com uma diretora de um *centro de ensino* da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). A cada semestre, um funcionário do centro recebia uma lista de disciplinas com demanda e horários já fixos. O funcionário deveria então atribuir salas para as disciplinas sempre atento com as demandas das disciplinas e as capacidade e especificidades das salas. Em geral, este trabalho era realizado manualmente.

Com as nossas leituras sobre o assunto, percebemos que a Universidade de Munique [veja Abdennadher et al., 2000, Sec. 2] e a Universidade Federal de Santa Catarina tratam o problema da atribuição de salas para disciplinas de maneira similar. Há uma primeira fase onde são atribuídos horários para as disciplinas. Nesta fase, as salas não são consideradas e o objetivo é resolver uma variante do *problema do horário* onde são dadas disciplinas com horas-aula por semana e horários que podem ser ocupados pelas horas-aula. Este problema não é tema deste trabalho. Depois disso, uma outra fase é realizada para atribuir salas para disciplinas. O nosso trabalho está relacionado à última fase citada, onde já conhecemos os horários das disciplinas e suas demandas. Note que, para o caso da UFSC, os alunos se matriculam em uma disciplina em uma fase intermediária, já que no momento da atribuição de salas, conhecemos a demanda da disciplina.

Dito isso, vale a pena comentar sobre dois problemas conectados: *o problema do horário* (*the timetabling problem*) e *o problema da atribuição de sala* (*the classroom assignment problem*). No problema do horário, são dados um conjunto de horários, uma coleção de horários para cada professor, uma coleção de horários para cada disciplina, e o número de horas por disciplina para cada professor. Neste caso, o problema solicita uma atribuição de disciplinas para professores que atenda aos horários dos professores e das disciplinas [veja Even et al., 1975, Sec. 1]. Muitos trabalhos tratam de uma variante do problema do horário chamado de *problema do horário em universidade*. Podemos citar alguns exemplos. Daskalaki et al. [2004] apresentam soluções para um departamento de engenharia da Universidade de Patras, na Grécia. Os autores Daskalaki e Birbas [2005] apresentam soluções eficientes para o problema. Babaei et al. [2015] apresentam uma análise de alguns métodos utilizados para resolver esta variante. Vale a pena observar a forma como os autores apresentam as variantes para o problema do horário [veja Babaei et al., 2015, Fig. 1]. Carter e Laporte [1997] desenvolveram um bom trabalho que agrupa os problemas citados acima (além de outros também conectados) e que faz um apanhado dos algoritmos para resolvê-los. A dificuldade do problema foi demonstrada por Even et al. [1975].

Muitos trabalhos também foram desenvolvidos para o problema da atribuição de sala. Apesar de tratarem também do problema do horário, Phillips et al. [2015] desenvolveram métodos de programação inteira para problemas da atribuição de sala da Universidade de Auckland, na Nova Zelândia. Abdennadher et al. [2000] usaram programação lógica para resolver tal problema. A dificuldade do problema foi demonstrada por Carter e Tovey [1992]. A partir deste ponto, concen-

tramos no problema da atribuição de sala.

Este trabalho apresenta um sistema formado por dois componentes principais: uma *interface web* e um *programa de computador* que utiliza a ferramenta de otimização Gurobi [Gurobi Optimization, 2019]. O papel da *interface* é realizar a interação entre um usuário e o programa de computador, além de apoiar com a entrada e saída dos dados. O papel do programa é sugerir uma atribuição de salas para disciplinas de graduação da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

Os dados de entrada são formados por *uma lista de disciplinas* e *uma lista de salas*. Na lista de disciplinas, os dados para cada disciplina são: *o código da disciplina*; (que pode ter uma ou mais turmas)*; o código da turma da disciplina*; *o número de vagas ofertadas*; *o número de vagas ocupadas*; e *uma lista de horários da disciplina*, sendo que cada horário é seguido do *tipo da sala* requisitada. Na lista de salas, os dados para cada sala são: *o nome da sala*; *a capacidade da sala*; *o tipo de sala (teórica, prática, laboratório, etc)*; e uma *prioridade da sala por período do dia* (manhã, tarde e noite). Durante a descrição do nosso trabalho, falaremos um pouco mais sobre a prioridade da sala por período.

O programa de computador desenvolvido recebe uma lista de disciplinas e uma lista de salas como mencionadas anteriormente e devolve uma sugestão de atribuição de salas para as disciplinas dadas na entrada. É importante dizer que tal programa usa uma versão acadêmica da ferramenta de otimização Gurobi. Por isso, é esperada que a sugestão dada pelo programa seja satisfatória.

Os dados de entrada relacionados às disciplinas estão disponíveis em um sistema da UFSC chamado CAGR (Sistema de Controle Acadêmico da Graduação – `https://cagr.sistemas.ufsc.br/`). A *interface* dá a opção da entrada dos dados de forma manual. Além disso, ela pode capturar as informações das disciplinas acessando de maneira automática o sistema CAGR. A nossa interface armazena os dados em um banco de dados. Uma requisição de uma atribuição de salas gera a entrada para o programa de otimização acessando os dados armazenados no banco de dados. Os dados de saída são apresentados na forma convencional: cada sala s possui uma tabela (horário $\times$ dia da semana) com o código de uma disciplina–turma d na entrada $(i \times j)$ para indicar que a sala s está alocada para a disciplina-turma d no horário i e no dia da semana j.

Na próxima seção descrevemos um pouco da estrutura da universidade, parte que julgamos ser importante para a realização do levantamento dos dados de entrada.

Um pouco da estrutura da UFSC

A UFSC possui cinco Campi. Eles estão localizados nas cidades Araranguá, Blumenau, Curitibanos, Florianópolis e Joinville. Todos os Campi possuem *centros de ensino*. Os centros são instituições da UFSC com infraestrutura e recursos humanos para atender a sociedade. Os centros contemplam os *departamentos* e os *cursos de graduação e pós-graduação*. Os professores estão lotados nos departamentos e as disciplinas pertencem aos cursos. Dessa forma, cada disciplina possui um código que a associa ao departamento que, por sua vez, possui um professor que a ministrará. Uma disciplina é composta por *créditos* semanais. A cada crédito semanal é atribuída uma *hora-aula* semanal. Os créditos semanais de uma disciplina podem ser distribuídos nos dias da semana. Uma disciplina com 6 créditos semanais poderia ter seus créditos distribuídos assim: 4 créditos na segunda-feira com início às 18:30h e 2 créditos na quarta-feira com início às 20:20h; ou 2 créditos na segunda, quarta e sexta-feira sempre com início às 18:30h. Os créditos de uma disciplina em um dia/hora da semana serão também chamados de *horários* da disciplina daquele dia. As salas estão localizadas em edifícios que fazem parte da infraestrutura dos centros. Até onde sabemos, são funcionários dos centros de ensino quem realizam (manualmente) as atribuições das

salas para disciplinas dos cursos por eles administrados. Temos conhecimento de que alguns centros de ensino levam semanas para realizarem as atribuições.

Em seguida descrevemos como tratamos a entrada e a saída dos dados do problema da atribuição de salas para disciplinas.

Sobre a entrada e a saída dos dados

O sistema desenvolvido mantém dois bancos de dados. Um armazena os dados referentes às disciplinas de cada centro e o outro os dados referentes às salas de cada centro. Um funcionário de um centro usa a *interface web* desenvolvida para acessar o sistema de atribuição de salas. Assim, o sistema acessa os bancos de dados e permite o usuário obter informações de disciplinas e salas do seu correspondente centro.

Apesar do sistema obter de um banco de dados as informações relacionadas às disciplinas e salas, um usuário do sistema pode ainda editar/cadastrar novas salas e editar/cadastrar novas disciplinas. A requisição da atribuição também é realizada pelo usuário utilizando o sistema. Neste momento, o sistema monta os arquivos de entrada para um programa de computador que constrói um modelo de programação inteira e utiliza a Gurobi para resolver o modelo. O sistema devolve ao usuário as tabelas das atribuições das disciplinas para cada sala, depois de obtida uma solução satisfatória.

A quantidade de dados da entrada pode ser razoavelmente grande por se tratar de uma atribuição de salas realizada para muitas disciplinas de vários cursos de um centro. Por exemplo, para um centro real da UFSC com 5 cursos de graduação, totalizaram 204 disciplinas (375 horários) no primeiro semestre de 2020. Outro centro, com 15 cursos de graduação, totalizaram 946 disciplinas (1.648 horários) no mesmo semestre citado. Em cada semestre, os dados relacionados às disciplinas de um curso são disponibilizados no CAGR por cada coordenador de curso. Com isso, apesar de atualmente o sistema CAGR não possuir uma consulta que agrupa todas as disciplinas de um centro, é possível implementar tal recurso recuperando todas as disciplinas da UFSC, classificando as disciplinas por departamento e depois agrupando as disciplinas nos centros aos quais os departamentos pertencem. Fizemos isso através do desenvolvimento de um *web scraper* automático[1] para coletar informações de disciplinas através de consultas ao servidor *web* do sistema CAGR. Com isso, conseguimos construir a entrada dos dados de maneira rápida e segura. Pequenos ajustes, se necessário, são permitidos através dos recursos de edição de disciplinas ou salas do nosso sistema.

A saída da atribuição é simples e intuitiva. Disponibilizamos, para cada sala, o horário e o dia das disciplinas–turmas na sala. A Tabela 1 ilustra uma saída para uma sala.

Em seguida apresentamos o modelo de programação inteira desenvolvido.

Sobre o problema e o modelo de programação inteira

Carter e Tovey [1992] mostram que o problema de viabilidade de uma atribuição de salas (considerando somente as restrições de que todo horário de uma disciplina é associado a uma única sala e as disciplinas com horários comuns podem ocupar no máximo uma sala) é NP-completo. O problema tratado por este trabalho, além das restrições que o deixam *difícil*, possui ainda algumas restrições particulares, o que é comum acontecer devido às particularidades de cada universidade. O programa precisa encontrar salas para cada disciplina onde o tipo da sala coincide com o tipo requisitado. A capacidade da sala deve ser *fortemente* atendida. Pode acontecer da capacidade de uma sala não ser suficiente para atender a demanda de uma disciplina. Casos de atribuições deste

[1]Um programa que consulta servidores *web*, que analisa os dados coletados e que extrai informações de interesse dos dados coletados [Mitchell, 2018].

Horário	Segunda	Terça	Quarta	Quinta	Sexta	Sábado
07:30	CIT7221-06652 (22)	—	—	—	—	—
08:20	CIT7221-06652 (22)	—	—	—	—	CIT7247-06652 (29)
09:10	—	—	—	CIT7236-06652 (24)	—	CIT7247-06652 (29)
10:10	—	—	—	CIT7236-06652 (24)	—	CIT7247-06652 (29)
11:00	CIT7224-06652 (32)	—	—	CIT7226-06652 (40)	—	CIT7247-06652 (29)
13:30	CIT7224-06652 (32)	—	—	CIT7226-06652 (40)	—	—
14:20	FQM7110-02653A (45)	EES7362-02653B (45)	FQM7110-02653A (45)	EES7362-02653B (45)	—	—
15:10	FQM7110-02653A (45)	EES7362-02653B (45)	FQM7110-02653A (45)	EES7362-02653B (45)	—	—
16:20	FQM7102-02653 (45)	EES7362-02653A (45)	FQM7102-02653 (45)	EES7362-02653A (45)	—	—
17:10	FQM7102-02653 (45)	EES7362-02653A (45)	FQM7102-02653 (45)	EES7362-02653A (45)	—	—
18:30	CIT7590-06652 (25)	—	CIT7226-06652 (40)	—	CIT7224-06652 (32)	—
19:20	CIT7590-06652 (25)	—	CIT7226-06652 (40)	—	CIT7224-06652 (32)	—
20:20	CIT7590-06652 (25)	CIT7236-06652 (24)	—	CIT7221-06652 (22)	—	—
21:10	CIT7590-06652 (25)	CIT7236-06652 (24)	—	CIT7221-06652 (22)	—	—

Tabela 1: Disciplinas alocadas para uma *sala teórica* com capacidade para 45 alunos. As informações em cada entrada não vazia são: código da disciplina (as três letras representam o departamento e os quatro dígitos formam um código da disciplina no departamento), o código da turma (os dois primeiros dígitos representam o semestre (ou fase) da disciplina no curso e os três últimos dígitos formam um código do curso da disciplina; uma letra opcional pode ocorrer dependendo do número de turmas da disciplina) e quantidade de alunos matriculados.

tipo, onde a demanda é maior que a oferta, devem ser penalizadas. Há restrições que não permitem que duas disciplinas ocupem a mesma entrada da tabela de uma mesma sala (duas disciplinas com horários comuns não podem ser alocadas à mesma sala). A grande maioria dos cursos de graduação da UFSC são compostos por *fases* (semestres). Uma solicitação feita por um centro foi minimizar a troca de salas de alunos de uma determinada fase. Dito de forma diferente, deveríamos manter alunos de uma mesma fase em uma mesma sala. Outra peculiaridade se refere ao uso de salas em determinados períodos do dia. Algumas salas com quadro de vidro possuem janelas voltadas para o leste e outras para o oeste. Para evitar o reflexo do sol na parte da manhã (tarde), as salas com janelas voltadas para o leste (oeste) deveriam ser evitadas no período da manhã (tarde). Além disso, é bom que os horários de uma disciplina que requisita muitos horários teóricos sejam alocados a uma mesma sala, ou seja, aulas teóricas de uma disciplina devem ser dadas em uma mesma sala teórica. Por fim, devido a dificuldades relacionadas à infraestrutura de alguns centros, é bom que o número de salas utilizadas sejam o mínimo possível. Dito isso, vamos aos dados do problema.

- Um conjunto finito de tipos de salas $\mathbb{T}$;
- Um conjunto de salas $R = \{r_1, r_2, \ldots r_{n_r}\}$ onde cada elemento r_i do conjunto é uma tupla $r_i = (q_i^r, c_i, t_i, p_i^1, p_i^2, p_i^3)$, sendo q_i^r a descrição da sala, $c_i \in \mathbb{N}$ a capacidade da sala, $t_i \in \mathbb{T}$ é o tipo da sala, $p_i^j \in \mathbb{N}$ a prioridade de uso da sala no período j;
- Um conjunto de horários semanais $H = \{h_1, \ldots, h_{n_h}\}$ onde cada elemento h_i do conjunto é uma tupla $h_i = (d_i, h_i')$ com $d_i \in \{1, \ldots, 7\}$ (dia da semana entre segunda e sábado) e $h_i' \in \{1, \ldots, 14\}$ (um horário de um conjunto com 14 elementos {07:30, 08:20, . . . , 21:10}, veja a coluna mais à esquerda da Tabela 1);
- Um conjunto de fases de um curso $S = \{s_1, \ldots, s_{n_s}\}$ onde cada elemento s_i do conjunto é uma tupla $s_i = (c_i, f_i)$ sendo $c_i \in \{1, \ldots, m\}$ (m cursos no total) e $f_i \in \{1, \ldots, n_f\}$ (fases do curso c_i); e
- Um conjunto de disciplinas $D = \{d_1, d_2, \ldots, d_k\}$ onde cada elemento d_i do conjunto é uma tupla $d_i = (q_i^d, s_i, n_i, ((h_i^1, t_i^1), \ldots, (h_i^k, t_i^k)))$, sendo q_i^d a descrição da disciplina, $s_i \in S$ é

curso e a fase da disciplina, n_i a demanda da disciplina, e (h_i^j, t_i^j) com cada $h_i^j \in H$ sendo um horário da disciplina e com cada $t_i^j \in \mathbb{T}$ sendo o tipo da sala a ser alocada para o horário h_i^j.

Deste ponto em diante, denotaremos uma sala de R por r, uma disciplina de D por d, uma fase de um curso de S por s e um horário de H por h. Denotamos os horários de uma disciplina d por $H(d)$, a demanda de uma disciplina d por $n(d)$, a capacidade de uma sala r por $c(r)$, o tipo de uma sala r por $t_r(r)$, o tipo de uma sala requisitada por uma disciplina d no horário h por $t_d(d,h)$ e a fase de uma disciplina por $f(d)$. Agora começamos a definir o modelo pelas *variáveis de decisão*.

- $x_{rdh} = \begin{cases} 1, \text{se a sala } r \text{ é atribuída à disciplina } d \text{ no horário } h \\ 0, \text{caso contrário,} \end{cases}$
- $y_{rs} = \begin{cases} 1, \text{se a sala } r \text{ é atribuída a alguma disciplina no curso e fase } s = (c, f) \\ 0, \text{caso contrário,} \end{cases}$
- $z_r = \begin{cases} 1, \text{se a sala } r \text{ é atribuída a pelo menos um horário de } H \\ 0, \text{caso contrário,} \end{cases}$
- $w_r = \begin{cases} 1, \text{se a sala } r \text{ é atribuída para disciplina } d \text{ e } n(d) > c(r) \\ 0, \text{caso contrário.} \end{cases}$

Em seguida, apresentamos as *restrições* do modelo.

1. No máximo uma sala é atribuída a um horário h de uma disciplina d:

$$\sum_{r \in R} x_{rdh} <= 1, \forall d \in D \text{ e } \forall h \in H(d).$$

2. No máximo uma disciplina d ocupa uma sala r no horário h:

$$\sum_{\forall d \in D : h \in H(d)} x_{rdh} <= 1, \forall r \in R \text{ e } \forall h \in H.$$

3. Uma sala r é atribuída a uma disciplina d se a demanda de d é menor ou igual que a capacidade de r:

$$n(d)x_{rdh} <= c(r), \forall r \in R, \forall d \in D \text{ e } \forall h \in H(d).$$

Para esta restrição precisamos relatar o seguinte. Esta restrição pode ser descartada para incentivar a atribuição de salas aos horários de disciplinas cuja demanda é maior que a oferta. Quando está restrição não é considerada, uma porção dos termos da função objetivo privilegiará pequenas violações da capacidade (procure por $\star$ na função objetivo).

4. O horário h de uma disciplina d pode ser associado a uma sala r se o tipo da sala requisitada por d no horário h é igual ao tipo de r:

$$t_d(d,h)x_{rdh} = t_r(r)x_{rdh}, \forall r \in R, \forall d \in D \text{ e } \forall h \in H(d).$$

5. Se uma disciplina d tem dois (ou mais) horários h' e h'', ambos requisitando uma sala teórica, então os horários devem ser associados a uma mesma sala:

$$x_{rdh'} = x_{rdh''}, \forall r \in R, \forall d \in D \text{ e } \forall (h', h'') \in H(d) \text{ tal que } t_d(d, h') = t_d(d, h'') = \text{ 'teórica' }.$$

6. As salas que foram atribuídas a alguma disciplina (na função objetivo forçaremos $z_r = 0$ quando não houver disciplina associada a sala r):

$$z_r >= x_{rdh}, \forall r \in R, \forall d \in D \text{ e } \forall h \in H(d).$$

7. As fases de um curso em uma sala (na função objetivo forçaremos a soma dos y_{rs} ser pequena):

$$y_{rs} >= x_{rdh}, \forall r \in R, \forall d \in D, \forall h \in H(d) \text{ e } \forall s = (c_i, f_i) \in S, \text{tal que } f_i = f(d).$$

8. As salas que foram atribuídas a alguma disciplina cuja demanda é maior que a capacidade das salas.

$$w_r \geq x_{rdh}, \forall r, \forall d \text{ e } \forall h \in H(d) \text{ tal que } n(d) > c(r).$$

A restrição 8 é considerada somente quando a restrição 3 não é considerada.

Por último, apresentamos a *função objetivo*. Adicionalmente às notações já citadas anteriormente, denotamos por $p(r, h)$ a prioridade da sala r no horário h.

$$\min \sum_{r \in R} c(r) z_r + \sum_{r \in R} \sum_{d \in D} \sum_{h \in H(d)} p(r, h) x_{rdh} +$$

$$\star \sum_{r \in R} \sum_{d \in D'_r} (n(d) - c(r)) w_r + \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} y_{rs} + \sum_{d \in D} \sum_{h \in H(d)} M(1 - \sum_{r \in R} x_{rdh}).$$

Na função objetivo, $D'_r = \{d \in D \ : \ n(d) > c(r)$ para uma sala r fixa$\}$. Notem que existem cinco grupos de somatórios na função objetivo. O primeiro está relacionado à questão de minimizar o número de salas usadas. O segundo considera a prioridade do uso de uma sala em diferentes períodos do dia. O terceiro considera a diferença entre a demanda e a oferta para salas possivelmente utilizadas por disciplinas cuja demanda é maior que a capacidade das salas. É importante dizer que o coeficiente de w_r acumula tais diferenças entre as demandas de disciplinas e a capacidade da sala r. Uma sala r atribuída para disciplinas cujas demandas são menores ou iguais que a capacidade de r força $w_r = 0$ pois no somatório $n(d) - c(r)$ sempre será positivo (devido a escolha de d) e a função objetivo é de minimização. Além disso, este terceiro grupo de somatórios é considerado na função objetivo somente quando a restrição 3 **não** é considerada uma *restrição forte* pelo modelo. O quarto considera as fases utilizadas por sala e o quinto, com um M grande, privilegia a atribuição de horários em salas de aula. O valor adotado para M foi 1.000.

Na próxima seção descrevemos a aplicação do modelo aos centros da universidade e seus resultados.

Apresentação dos dados e resultados

A Universidade Federal de Santa Catarina possui 15 centros de ensino, 68 departamentos, 5 coordenadorias especiais (mais ou menos equivalentes aos departamentos) e 106 cursos de graduação. Além disso, a universidade possui cursos de pós-graduação, um colégio de aplicação, um núcleo de desenvolvimento infantil, um hospital universitário, atividades de extensão, culturais, artísticas e esportivas, e várias unidades administrativas [Secretaria de Planejamento e Orçamento, 2018]. A Tabela 2 apresenta informações importantes para o nosso trabalho como os centros da universidade, a quantidade de cursos por centro, a quantidade de horários que devem ser alocados em alguma sala do centro, a quantidade de salas disponíveis por centro e a *densidade* de horários por sala.

Centro de ensino	Sigla	C	H	S	D
Centro de Blumenau	BLU	6	404	25	16,16
Centro de Ciências Rurais	CBS	4	454	44	10,32
Centro de Ciências Agrárias	CCA	4	369	48	7,69
Centro de Ciências Biológicas	CCB	2	573	49	11,69
Centro de Comunicação e Expressão	CCE	17	754	147	5,13
Centro de Ciências Jurídicas	CCJ	2	306	33	9,27
Centro de Ciências da Saúde	CCS	6	899	78	11,52
Centro de Desportos	CDS	2	222	22	10,09
Centro de Ciências da Educação	CED	5	527	74	7,12
Centro de Filosofia e Ciências Humanas	CFH	13	514	29	17,72
Centro de Ciências Físicas e Matemáticas	CFM	8	851	31	27,45
Centro Socioeconômico	CSE	9	529	42	12,59
Centro Tecnológico	CTC	15	1.648	111	14,85
Centro Tecnológico de Joinville	CTJ	8	568	42	13,52
Centro de Ciências, Tecnologias e Saúde	CTS	5	375	52	7,21

Tabela 2: Centros da universidade com a quantidade de cursos presenciais (C), horários a alocar (H), número de salas (S) e densidade (D - horários a alocar por sala).

Os horários das disciplinas de cada curso foram obtidos através de um *web scraper* automático como citado anteriormente. As salas administradas por cada centro foram obtidas através do Sistema Integrado de Espaço Físico (SIEF) da UFSC (`https://sief.sistemas.ufsc.br/` – acesso somente por usuários cadastrados). Os dados dos centros CFH e CTS foram tratados por funcionários que realizam a atribuição de salas para disciplinas e por isso, podemos afirmar que são mais precisos. Atualmente, estes centros utilizam as sugestões dadas pela ferramenta para tomada de decisões. O CTS possui 52 salas classificadas em 15 tipos (35 salas para aulas teóricas, 4 salas para aulas com computadores, e 13 salas para aulas em laboratórios específicos). Um dos nossos experimentos para o CTS considerou prioridades em determinados períodos do dia para atribuição de algumas salas. Foi observado que a solução sugerida alocava tais salas nos períodos do dia onde a prioridade era alta. O CFH possui 29 salas todas elas consideradas salas para aulas teóricas. Para os outros centros, todas as salas foram obtidas pelo sistema SIEF utilizando a opção de consulta que devolvia salas para aulas teóricas. Por isso, todas as salas obtidas por este meio foram consideradas por este trabalho como sendo salas para aulas teóricas.

Os modelos de programação inteira desenvolvidos para cada centro foram resolvidos através da ferramenta Gurobi, versão acadêmica 9.0.2. A solução para cada centro foi obtida separadamente, isto é, como temos 15 centros de ensino, tivemos então 15 instâncias independentes uma da outra e portanto 15 soluções distintas. Uma máquina com o sistema operacional Linux Debian 3.16.43-2 com 16 processadores Intel(R) Xeon(R) 2.40GHz e com 65 GB foi utilizada. Com relação aos parâmetros para a Gurobi, consideramos o seu preprocessamento, um programa

relaxado foi resolvido pelo método simplex e utilizamos heurísticas da ferramenta. O número de *threads*, o limite de tempo de execução e o número máximo de nós explorados da árvore de *Branch & Bound* foram, respectivamente, 8 *threads*, 5 horas e 1.000 nós. Quando o limite de tempo ou o número de nós máximo são alcançados, a execução da ferramenta para apresentando um relatório. Como o paralelismo foi utilizado pela ferramenta, o número de nós explorados da árvore pode ser um pouco maior que o configurado[2]. Na tabela 3, apresentamos, para cada centro, alguns números relacionados ao método que dá soluções para o problema e o *gap*.

	Branch & Bound					*Branch & Bound*			
Centro	Nós (n.)	Simplex (it.)	Tempo (s.)	*Gap* (%)	Centro	Nós (n.)	Simplex (it.)	Tempo (s.)	*Gap* (%)
BLU	1.415	1.130.549	103,83	0,3606	CED	1.090	6.085.634	2.416,00	1,0271
CBS	1.024	4.690.929	1.161,78	2,8502	CFH	1.275	3.302.234	926,21	0,2728
CCA	1.473	8.761.903	1.903,10	1,9595	CFM	1.060	156.523.73	6.874,98	0,7995
CCB	1	330.528	223,27	0*	CSE	1.066	1.939.251	652,30	0,3717
CCE	1	4.088.337	18.000,07	0,8281	**CTC**	**164**	**7.062.086**	**46.002,77**	**6,7156**
CCJ	1	22.020	3,59	0*	CTJ	1.178	8.164.981	3.217,01	6,4748
CCS	1.317	12.178.628	12.799,50	0,8403	CTS	0	45.877	16,41	0*
CDS	1	22.310	3,04	0*					

Tabela 3: Número de nós, o número de iterações do método simplex, o tempo de execução (em s.) e o *gap*.

A instância CCE (sublinhada) foi a única interrompida pelo tempo de 5 horas. Uma solução ótima foi encontrada para as instâncias onde o *gap* é $0^\star$. Para a instância CTS, uma solução ótima do problema original foi encontrada através de uma solução ótima do problema relaxado. Por isso, não foi necessário executar o método *Branch & Bound*. Por uma questão numérica, a instância CTC (em destaque na Tabela 3) foi tratada de forma diferente. Para esta instância, a relaxação do problema correspondente ao nó raiz da árvore foi resolvido pela ferramenta através do *método da barreira*[3]. Ainda para este caso, a execução da ferramenta foi interrompida depois 100 nós explorados da árvore de *Branch & Bound* com mais de 12 horas e meia de execução total. O *gap* de 6,7156% foi obtido depois de 9 horas de execução.

A Tabela 4 reescreve alguns dados da Tabela 2 e apresenta algumas estatísticas referente as atribuições de salas obtidas para cada centro. Observe os resultados para CSE. Há 3 horários de disciplinas cujas demandas são 43, 35 e 12. Não foi atribuída nenhuma sala para tais horários mesmo havendo 6 salas em $\hat{\mathrm{S}}$ (veja a descrição na tabela). Ao verificarmos os dados de entrada, constatamos que isso aconteceu devido à existência de cinco salas com capacidade 0 e uma sala com capacidade 1 atualmente cadastradas no sistema SIEF para este centro. Observe a alta densidade D de horários por sala para o CFM. Isso ajuda a justificar a quantidade de horários não alocados.

A Figura 1 mostra o gráfico $(\mathrm{D} \times \hat{\mathrm{S}})$ sem os centros CFM e CCE que possuem, respectivamente, os valores máximo e mínimo para a densidade de horários por sala. Essa figura nos mostra informações interessantes. Primeiro note o decaimento no número de salas em $\hat{\mathrm{S}}$ ao longo do aumento da densidade. Depois, observe que todas as salas são ocupadas por aulas para a graduação para todos os centros com densidade maior que 14. Lembre que 14 é também o número de horários totais em um dia da semana (veja a primeira coluna da Tabela 1). Ou seja, mesmo havendo pelo menos $14 \times \mathrm{S} \times 5$ possibilidades para alocação de horários em salas de um centro, para obter uma boa solução para as nossas instâncias, somente $14 \times \mathrm{S}$ possibilidades foram necessárias para que tais centros utilizassem todas as salas para aulas para a graduação. O CTJ, com $\mathrm{D} = 13,52$, possui 2 salas em $\hat{\mathrm{S}}$.

[2]Sobre isso veja `https://www.gurobi.com/documentation/9.0/refman/nodelimit.html`.
[3]Sobre isso veja `https://www.gurobi.com/documentation/9.0/refman/method.html`

Centro	H	$\bar{H}$	$\hat{H}$	S	$\hat{S}$	D	$\hat{D}$
BLU	404	1	6	25	0	16,16	1,36
CBS	454	0	0	44	9	10,32	2,40
CCA	369	0	2	48	22	7,69	1,55
CCB	573	0	1	49	8	11,69	2,36
CCE	754	0	0	147	85	5,13	1,33
CCJ	306	0	16	33	13	9,27	1,78
CCS	899	0	0	78	3	11,52	3,04
CDS	222	0	0	22	7	10,09	1,17
CED	527	0	8	74	39	7,12	1,30
CFH	514	27	88	29	0	17,72	1,22
CFM	851	187	82	31	0	27,45	1,52
CSE	529	3	102	42	6	12,59	1,27
CTC	**1.648**	**5**	**0**	**111**	**0**	**14,85**	**2,12**
CTJ	568	0	0	42	2	13,52	1,33
CTS	375	0	0	52	29	7,21	1,38

Tabela 4: H – número de horários totais; $\bar{H}$ – número de horários não alocados; $\hat{H}$ – número de horários alocados cuja demanda é maior que a capacidade da sala; S – número de salas totais; $\hat{S}$ – número de salas sem aulas para a graduação; D – densidade de horários por sala; $\hat{D}$ – a soma do número de salas utilizadas por fases de todos os cursos de um centro dividido pela quantidade máxima de fases de um curso deste mesmo centro.

Ainda na Tabela 4, podemos observar que alguns centros não possuem salas disponíveis para todas as disciplinas que compartilham um determinado horário comum (coluna $\bar{H}$), e algumas atribuições possuem demanda maior que a oferta (coluna $\hat{H}$). Os centros BLU, CFH, CFM, CSE e CTC possuem horários que não foram alocados a nenhuma sala, enquanto que os centros BLU, CCA, CCB, CCJ, CED, CFH, CFM e CSE possuem horários de disciplinas que foram alocados a salas cujas capacidades são menores que as demandas. Analisamos os dados para esses centros com mais cuidado e observamos que os casos para CCA e CCB não são preocupantes pois a diferença máxima entre a demanda e a oferta é 4 e 2, respectivamente. Para os outros centros, a diferença é considerável: BLU – 16 (caiu para 13 depois que consideramos um auditório com 170 lugares); CCJ – 18; CED – 18; CFH – 72 (uma disciplina com 107 alunos foi alocada para uma sala com capacidade igual a 35); CFM – 70 (uma disciplina com 100 alunos foi alocada para uma sala com capacidade igual a 30); e CSE – 25. Na próxima seção consideramos as salas de aula do *Espaço Físico Integrado* (EFI), um espaço administrado pela Pró-Reitoria de Graduação da UFSC com possibilidade de alocação de salas para disciplinas para tentar amenizar o cenário apresentado.

Uma proposta para os centros CCJ, CED, CFH, CFM, CSE e CTC utilizando o EFI

Segundo o sistema SIEF, o espaço EFI possui 20 salas de aula com possibilidade de alocação para disciplinas, todas localizadas no Campus Florianópolis: 4 salas com 50 lugares; 8 salas com 60 lugares; 2 salas com 70 lugares; e 6 salas com 100 lugares. Como os centros CCJ, CED, CFH, CFM, CSE e CTC estão localizados em Florianópolis, tais centros podem requisitar acesso às salas do EFI. A nossa proposta é simples e razoavelmente satisfatória. Como as salas do EFI são salas com capacidades *grandes*, escolhemos as disciplinas com as maiores demandas para cada um dos centros citados: 4 disciplinas do CCJ (demanda ≥ 60); 4 disciplinas do CED (demanda ≥ 50); 44 disciplinas do CFH (demanda ≥ 45); 118 disciplinas do CFM (demanda ≥ 45); 18 disciplinas do CSE (demanda ≥ 55); e 5 disciplinas do CTC (as disciplinas sem salas – veja Tabela 4). Os resultados são apresentados na Tabela 5.

Com a inserção das salas do EFI (20 salas de aula teórica) e com essa proposta simples, conseguimos diminuir o número de horários não alocados de 223 para 51; o número de horários cuja

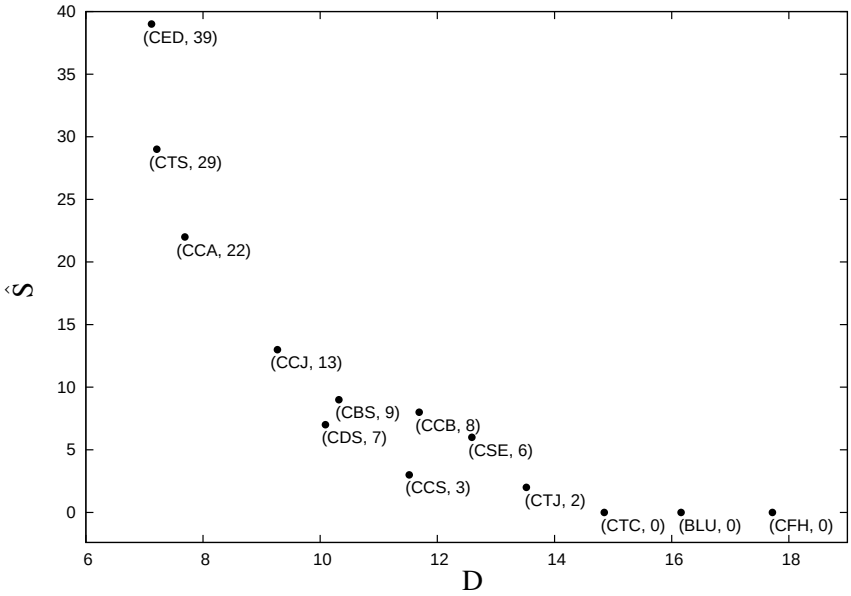


Figura 1: Gráfico da densidade D por salas em $\hat{S}$. Os valores para D mínimo (CCE) e máximo (CFM) foram removidos para um melhor enquadramento da figura.

Centro	H	$\bar{H}$	$\hat{H}$	S	$\hat{S}$	D	$\hat{D}$	DIF
CCJ	302	0	12	33	12	9,15	1,83	7
CED	521	0	3	74	39	7,04	1,29	6
CFH	454	8	39	29	0	15,65	1,28	9
CFM	622	40	0	31	0	20,06	1,44	0
CSE	495	1	38	42	6	11,78	1,35	13
CTC	1.643	0	0	111	0	14,80	2,12	0
EFI	337	2	5	20	0	16,85	1,08	7

Tabela 5: Todas as colunas aparecem também na Tabela 4, exceto pela última que mostra a diferença máxima entre a demanda de uma disciplina e a capacidade de uma sala para horários em $\hat{H}$.

demanda é maior que a capacidade da sala alocada de 305 para 100 (contamos também os valores dos centros CCA e CCB da Tabela 4); e a diferença máxima entre a demanda e a oferta (DIF) para todos os centros. Considerando os dados de entrada para os centros da UFSC e os resultados obtidos pelos nossos experimentos, o número de salas que poderiam ser utilizadas para outras atividades diferentes de aulas para a graduação nos Campi Araranguá, Blumenau, Florianópolis e Joinville é 29, 0, 191 e 2, respectivamente. Apesar disso, alguns centros ocupam todas as salas para aulas de graduação (veja $\hat{S}$ nas Tabelas 4 e 5). Por último, acreditamos que uma proposta ainda melhor pode ser desenvolvida a partir da participação de profissionais de cada centro.

Conclusão

Neste trabalho apresentamos um sistema e um modelo de programação inteira para o problema da atribuição de salas de uma universidade. As salas são atribuídas às disciplinas de graduação. A princípio, conhecemos a capacidade e as especificidades de cada sala, além de conhecermos também a demanda, os horários e o tipo de sala requisitado pelos horários das disciplinas. A entrada dos dados foram obtidas consultando sistemas *web* da universidade. As entradas relacionadas às disciplinas foram obtidas através de um *web scraper* automático. Usamos a ferramenta

Gurobi para resolver o modelo de programação inteira para cada centro de ensino da universidade. Os resultados são apresentados e podem ajudar profissionais nas tomadas de decisões.

Agradecimentos

Este trabalho foi parcialmente apoiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq (Proc. 423833/2018-9), e pelo Programa Institucional de Bolsas de Estágio da Pró-Reitoria de Graduação da UFSC (PIBE 2018 e 2019). Os autores agradecem o apoio recebido da Profa. Dra. Miriam F. Hartung, diretora do Centro de Filosofia e Ciências Humanas da UFSC, do Prof. Dr. Eugênio Simão, diretor do Centro de Ciências, Tecnologias e Saúde da UFSC, e dos servidores Gustavo G. F. de Souza e Jonatan S. U. De Moraes, administradores de edifícios da UFSC.

Referências

Abdennadher, S., Saft, M., e Will, S. (2000). Classroom assignment using constraint logic programming. In *PACLP'00: Proc. 2nd Intl. Conf. and Exhibition on Practical Application of Constraint Technologies and Logic Programming*.

Babaei, H., Karimpour, J., e Hadidi, A. (2015). A survey of approaches for university course timetabling problem. *Computers & Industrial Engineering*, 86:43–59.

Carter, M. W. e Laporte, G. (1997). Recent developments in practical course timetabling. In *international conference on the practice and theory of automated timetabling*, p. 3–19. Springer.

Carter, M. W. e Tovey, C. A. (1992). When is the classroom assignment problem hard? *Operations Research*, 40(1-supplement-1):S28–S39.

Daskalaki, S. e Birbas, T. (2005). Efficient solutions for a university timetabling problem through integer programming. *European Journal of Operational Research*, 160(1):106–120.

Daskalaki, S., Birbas, T., e Housos, E. (2004). An integer programming formulation for a case study in university timetabling. *European Journal of Operational Research*, 153(1):117–135.

Even, S., Itai, A., e Shamir, A. (1975). On the complexity of time table and multi-commodity flow problems. In *16th Annual Symposium on Foundations of Computer Science (sfcs 1975)*, p. 184–193. IEEE.

Gurobi Optimization, L. (2019). Gurobi optimizer reference manual. URL `http://www.gurobi.com`.

Mitchell, R. (2018). *Web scraping with Python: Collecting more data from the modern web*. "O'Reilly Media, Inc.".

Phillips, A. E., Waterer, H., Ehrgott, M., e Ryan, D. M. (2015). Integer programming methods for large-scale practical classroom assignment problems. *Computers & Operations Research*, 53: 42–53.

Secretaria de Planejamento e Orçamento, S. (2018). Boletim de dados. URL `http://dpgi.seplan.ufsc.br/files/2020/02/BOLETIM-DE-DADOS-2018-novo.pdf`.