

GERAÇÃO DE GRADE DE HORÁRIOS PARA DISCIPLINAS DE UMA INSTITUIÇÃO DE NÍVEL SUPERIOR UTILIZANDO PROGRAMAÇÃO LINEAR INTEIRA MULTIOBJETIVO

Delean Medeiros Ribeiro

Universidade Federal Fluminense - UFF
Rua Passo da Pátria, 156, São Domingos, Niterói, RJ
delean.m.ribeiro@gmail.com

Luiz Aizemberg

Universidade Federal Fluminense
Rua Passo da Pátria, 156, Bloco E, sala 440, São Domingos, Niterói, RJ
luizaizemberg@gmail.com

Eduardo Uchoa

Universidade Federal Fluminense
Rua Passo da Pátria, 156, Bloco E, sala 440, São Domingos, Niterói, RJ
uchoa@producao.uff.br

Resumo

Este trabalho propõe um modelo matemático de Programação Linear Mista para a criação do quadro de horários do curso de Engenharia de Produção da Universidade Federal Fluminense. O projeto desenvolveu-se com pesquisa na literatura correlata, concomitante a entrevistas com os envolvidos, visando entender as necessidades inerentes ao problema. Posteriormente, estruturou-se uma planilha eletrônica, no software MS Excel, para a armazenagem dos dados. Outros recursos utilizados na implementação do modelo foram: a linguagem Visual Basic for Applications (VBA), a biblioteca de funções UFFLP e o resolvidor CPLEX. Considerou-se as restrições naturais, o balanceamento entre as preferências dos docentes e a compactação dos horários. Os resultados encontrados foram favoráveis, tendo como parâmetros o curto período de geração e o baixo custo. A ferramenta apresentou uma flexibilidade ocasionada pelo balanceamento entre a preferência dos professores e a compactação, uma vez que o usuário responsabiliza-se por escolher a prioridade mais adequada ao momento.

Palavras-chave: Programação de grade horária, Programação Linear Inteira

Áreas Principais: Programação matemática, Otimização.

Abstract

This paper proposes a mathematical model by Mixed Linear Programming to optimize the timetable of the Production Engineering Department of Universidade Federal Fluminense. The project started with literature review and interviews with teachers and coordinator, to understand the needs of the department. Then, a MS Excel spreadsheet was developed with the mathematical model. Other resources used to implement the model were: Visual Basic for Applications (VBA) language, the library functions UFFLP and CPLEX solver. It was considered the natural constraints, and the balance between the teachers' preferences and schedule compression. The results were favorable, with low runtime and cost. The tool has good flexibility because the user is responsible for choosing the appropriate priority between teachers' preferences and schedule compression over time.

KEYWORDS: Timetabling, Integer Linear Programming.

Main areas: Mathematical Programming, Optimization.

1. Introdução

As organizações que atuam nos distintos seguimentos, no que tange a utilização dos recursos, devem estar preparadas para responder às oscilações do ambiente interno e externo de forma flexível e eficiente. Neste contexto sistêmico, as instituições de ensino superior (IES) para se adequarem à dinamicidade resultante das interações entre as variantes que compõem os cenários nos quais estão inseridas, necessitam do desenvolvimento e implementação de ferramentas de gestão que as auxiliem nos seus processos decisórios.

Os recursos de uma IES podem ser aglutinados em alguns conjuntos, tais como os corpos docente e discente, o espaço físico, financeiro, que coexistem em contínua interação. Sendo assim, a redução das perdas e dos conflitos provém do uso otimizado dos mesmos, para concomitante melhoria da qualidade de ensino. Para tanto, os conceitos que fundamentam a Pesquisa Operacional (PO) oferecem algumas possibilidades de análise, estruturação e solução dos problemas, como por exemplo, a Programação Linear Inteira (PLI).

Neste sentido, a elaboração da grade de horários de uma IES, conhecida na literatura como *university timetabling*, corresponde a uma atividade que pode contribuir para a maximização dos resultados esperados. Por um lado, ela afeta os recursos humanos em relação à utilização e planejamento das tarefas inerentes às suas funções, principalmente, no aspecto temporal. Por outro, uma distribuição de horários estruturada de forma coesa pode influenciar diretamente na motivação dos envolvidos em decorrência de possibilitar maiores oportunidades para aprimoramento profissional.

O problema de alocação dos professores a horários apresenta uma complexidade oriunda das peculiaridades dos distintos centros universitários. Apesar dos avanços tecnológicos, muitas IES costumam usar métodos manuais em detrimento dos métodos automatizados, devido ao elevado custo dos *softwares* disponíveis no mercado e da necessidade de uso sazonal desta prática, somente no início dos semestres letivos.

Sendo assim, neste trabalho será apresentada uma alternativa para a geração da grade de horário da faculdade de Engenharia de Produção, coordenada pelo Departamento de Engenharia de Produção (TEP) da Universidade Federal Fluminense (UFF). Para tanto, será usada a modelagem matemática da situação vinculada aos conceitos de PLI, e a posterior implementação nos elementos computacionais (MS Excel, *Visual Basic for Applications*, UFFLP).

De forma sucinta, pode-se dizer que a execução dos pressupostos sugeridos aqui resultará na alocação das disciplinas a dias da semana e horários, respeitando as restrições inerentes ao problema, tais como colisões de horários tanto de disciplinas em um mesmo semestre quanto disciplinas em semestre diferentes, lecionadas por um mesmo professor. Serão consideradas, também, as preferências de horários dos docentes, balanceamento da carga horária diária e diminuição de horários vagos entre disciplinas. Como existem três objetivos conflitantes (preferências dos professores, equilíbrio da carga horária e diminuição de horas vagas), tem-se um problema multiobjetivo que será tratado através da atribuição de pesos a cada objetivo individual.

O ponto central do problema estudado aqui, que difere dos da literatura, é o conceito de semestre. Além de proibir que disciplinas do mesmo semestre se sobreponham, são definidos os critérios de conveniência dos alunos e didáticos, sempre priorizando a turma de alunos que está em fase com seu semestre. Outra questão nova tratada neste trabalho é o tratamento dado aos alunos que estão fora de fase, dando uma pequena preferência para que as disciplinas com mais repetência de cada semestre não sejam alocadas no mesmo horário no semestre imediatamente posterior.

2. Revisão da Literatura

O problema de alocação dos professores a horários é abordado na literatura de diversas maneiras, cada uma mais adequada a um conjunto de situações inerentes aos parâmetros adotados. Como exemplo pode-se citar os seguintes métodos, segundo Góes (2005) e Oliveira *et al* (2012):

- Meta-heurísticos: Têm como principal objetivo encontrar soluções de boa qualidade, mas apresentam a limitação de não se poder garantir que a solução encontrada seja a ótima (Góes, 2005). Nesta categoria três métodos merecem atenção. O primeiro é o método do *Simulated Annealing*, que consiste em um processo iterativo que procura o conjunto de soluções ótimas possíveis através de uma estrutura predefinida, ou vizinhança (Thompson *et al*, 1996). O segundo é a Busca Tabu, proposto por Glover (1989), que dentro de uma região de soluções explora não somente os ótimos locais (Armentano *et al*, 2000), devido a interações que aceitam movimentos de piora para solução de problemas de otimização combinatória (Marinho *et al*, 2004). O terceiro método é o algoritmo GRASP (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedures*) no qual as interações podem ser divididas nas fases de construção, que usa um algoritmo guloso, e de busca local até que se obtenha uma solução melhor (Góes, 2005);
- Exatos: Neste conjunto sobressai-se o algoritmo *branch-and-bound*, utilizado pelos resolvidores comerciais. O presente trabalho utiliza o *branch-and-bound* do CPLEX;

O campo do conhecimento, o qual a Pesquisa Operacional abrange, apresenta considerável praticidade no processo decisório das organizações. A este fato deve-se o caráter de sua abordagem científica, por utilizar técnicas matemáticas com o objetivo de determinar como projetar, planejar e operar um sistema, geralmente sob condições de recursos escassos, como destacado por Góes (2005).

Ainda segundo o mesmo autor, os fundamentos da PO permitem determinar a melhor utilização de recursos limitados procurando determinar a programação otimizada de atividades ou recursos, fornecendo um conjunto de procedimentos e métodos quantitativos para tratar de forma sistêmica problemas que envolvam a utilização de recursos escassos, utilizando-se de modelos no processo de análise e tomada de decisão.

O conceito apresentado acima pode ser completado com aquele proposto por Montevechi (2000) que define a PO como um conjunto de métodos multidisciplinares. Estes envolvem o entendimento dos fatores técnicos ou psicológicos que, por sua vez, contribuem para a formação dos fenômenos econômicos ou humanos auxiliando na determinação racional de soluções mais eficientes ou mais econômicas usando procedimentos estatísticos e matemáticos com o emprego de computadores.

Dentre os modelos pode-se ressaltar a Programação Linear Inteira (PLI), que é um problema sujeito a restrições que dizem que todas ou algumas das suas variáveis são discretas. A PLI pode ser pura ou mista. Na primeira situação todas as variáveis estão sujeitas à condição de integralidade, enquanto que na segunda apenas algumas o estão. As variáveis binárias pertencem a um conjunto particular de variáveis inteiras, as quais podem assumir somente valores 0 (zero) ou 1 (um) e exprimem situações dicotômicas (Alves *et al*, 1997).

Denomina-se *Management Science* (MS) a área de estudos que utiliza computadores, estatística e matemática para resolver problemas de negócios, tais como problemas de otimização de recursos, de localização, de alocação de pessoas, etc. O método simplex apresenta resolução manual demorada, e por isso a abordagem gerencial acompanha um modelo computacional entendido como um conjunto de relações matemáticas e hipóteses lógicas, implementadas em computador de forma a representar um problema real, impulsionada atualmente pelo advento de sistemas de informação e desenvolvimento da informática (Lachtermacher, 2008).

A visão descrita no parágrafo precedente pode ser estendida para a situação descrita neste artigo ao considerar que uma IES requer as mais variadas técnicas administrativas para seu funcionamento duradouro. O *software* usado foi o MS Excel, junto com o UFFLP. Este, por sua vez, é uma *Dynamic Link Libray* (DLL) para Windows que pode ser chamada por programa escritos em *Visual Basic for Applications* (VBA) dentro da planilha de cálculo MS Excel, ou em programas em C/C++ (Pessoa *et al.*, 2011).

3. Descrição do Problema

A construção da grade de horários na IES estudada ocorre basicamente no início do semestre letivo, visando definir os horários das disciplinas ministradas por professores que podem lecionar uma ou mais disciplinas, considerando a LEI Nº 12.772, de 28 de dezembro de 2012, que regulamenta o magistério superior federal, o estatuto e o regimento geral da Universidade Federal Fluminense, aprovado pelo Conselho Federal de Educação conforme parecer nº 2/83, homologado através da Portaria Ministerial nº 177 de 2/5/83, publicado no Diário Oficial da União de 5/5/83.

No curso de Engenharia de Produção da UFF a metodologia de criação da grade ocorre com reuniões periódicas entre representantes da coordenação e do departamento, considerando principalmente a disponibilidade dos professores do TEP e de outros departamentos já alocados nos seus devidos semestres. O tempo demandando no decorrer desta sequência de ações pode se estender além do previsto, devido à incompatibilidade de horários entre os docentes de diferentes faculdades.

No ano de 2012 o curso ofertava 38 disciplinas específicas, dentre obrigatórias e optativas, possuindo em seu quadro de funcionários um total de 24 docentes. A distribuição das disciplinas do curso de Engenharia de Produção da UFF, oferecidas pelo TEP no ano de 2012 está representada no Quadro 1.

Semestres	Disciplinas
1º	Introdução à Engenharia de Produção;
2º	Fundamentos de Engenharia do Trabalho;
3º	Economia Aplicada à Engenharia; Metodologia Científica e Tecnológica;
4º	Pesquisa Operacional I; Engenharia Econômica; Organização do Trabalho;
5º	Pesquisa Operacional II; Estudo de Movimento e Tempos; Engenharia de Métodos I; Técnicas de Controle de Qualidade;
6º	Técnicas de Controle de Qualidade; Metodologia do Desenvolvimento do Produto; Sistemas de Informação; Pesquisa Operacional – Modelos Estocásticos;
7º	Gerenciamento da Qualidade Total; Arranjo Físico Industrial; Projeção da Viabilidade Técnica Econômica Financeira; Engenharia de Métodos;

8º	Higiene e Segurança Industriais; Planejamento de Controle de Produção I; Engenharia de Produtos e Processos; Gerência de Tecnologia; Automação da Produção; Contabilidade Gerencial e Custos industriais;
9º	Projeto Final Engenharia de Produção I; Tópicos Especiais de Produção; Introdução ao Direito II; Estágio Supervisionado em Engenharia de Produção;
10º	Projeto Final em Engenharia de Produção II;
Optativas	Gerenciamento de Projetos; Novas Formas de Gestão da Produção; Auxílio Multicritério à Decisão; Sistemas de Apoio Logístico; Confiabilidade Industrial; Análise de Dados Quantitativos; Gestão do Conhecimento; Técnicas Modernas de Produção.

Quadro 1 – Disciplinas ofertadas pelo Departamento de engenharia de Produção da UFF.

O desenvolvimento deste projeto almejou criar um sistema que aloque as disciplinas específicas do curso aos horários disponíveis, tendo como base o cronograma acadêmico do ano de 2012, considerando que as disciplinas estão previamente alocadas aos professores. As disciplinas podem ser divididas em três grupos com relação ao período de aula na semana: disciplinas com um período de duas horas seguidas, disciplinas de dois períodos com quatro horas seguidas, disciplinas com quatro horas com duas horas alternadas entre os dias da semana.

Três objetivos foram identificados no decorrer da elaboração, principalmente no âmbito das necessidades dos alunos, são estes: a minimização de horas vagas entre disciplinas, o balanceamento da carga horária diária, e as preferências de horários por parte dos professores.

4. Metodologia

Os procedimentos metodológicos realizados no desenvolvimento deste trabalho iniciaram com uma ampla pesquisa bibliográfica visando entender a retratação do problema por outros pesquisadores. Vale ressaltar o cuidado com a confiabilidade das fontes das informações, sendo estas selecionadas em documentos disponíveis em websites de revistas científicas e livros didáticos.

Quanto aos aspectos técnicos, seguiu-se uma análise qualitativa, etapa através da qual foi possível perceber a execução do processo atual pelos responsáveis da coordenação do curso e do departamento. Observou-se quais parâmetros recebiam mais atenção, como ocorria o fluxo de informação, a estimativa de durabilidade do processo, fluxograma, e a quantidade de professores.

Posteriormente, o trabalho entrou na fase de modelagem concomitantemente com a implementação, usando o ferramental computacional já mencionado. Assim, as seguintes condições foram encontradas:

- Os professores já se encontram alocados nas disciplinas, portanto eles indicam os horários disponíveis e suas preferências através de pesos para cada horário;
- São disponibilizados seis períodos por dia: 7h às 9h, 9h às 11h, 11h às 13h, 14h às 16h, 16h às 18h e 18h às 20h;
- Disciplinas com 3 ou 4 horas seguidas usam dois períodos contíguos e são alocadas 7h às 11h, 9h às 13h, 14h às 18h ou 16h às 20h;
- Disciplinas com duas aulas em dias diferentes são lecionadas segunda e quarta-feira ou terça e quinta-feira, sempre no mesmo horário;
- Disciplinas de um mesmo semestre não podem ser alocadas no mesmo horário.
- Disciplinas lecionadas por um mesmo professor, mesmo que pertencentes a semestres diferentes, não podem ser alocadas no mesmo horário;
- As disciplinas de outros departamentos são pré-fixadas e por isso no seu horário não serão alocadas disciplinas do mesmo semestre;
- Para cada semestre, existem limites superiores e inferiores (que podem ser zero) para quantidade de períodos com aulas em cada dia. A função destes limites é buscar um balanceamento da carga horária dos alunos entre os dias da semana. Para evitar inviabilidades, é permitido que estes valores não sejam respeitados, pagando-se uma penalidade por dia de violação;
- O usuário decide como ocorre o balanceamento entre minimizar os períodos vagos entre disciplinas (o tempo de almoço não é considerado um período vago), balancear a carga horária diária e maximizar as preferências dos professores referentes aos horários das disciplinas.

5. Modelo Matemático

Para a modelagem do problema, os parâmetros foram separados nos seguintes conjuntos e dados de entrada:

- D : conjunto de dias da semana;
- P : conjunto de períodos por dia. Assume-se que todos os dias possuem a mesma quantidade de períodos, numerados de 1 a 6;
- I : conjunto de semestres;
- B : conjunto de professores que lecionam disciplinas em semestres diferentes;
- M_{i1} : conjunto de disciplinas do semestre i com um período de aula;
- M_{i2} : conjunto de disciplinas do semestre i com dois períodos de aula em dias diferentes;
- M_{i3} : conjunto de disciplinas do semestre i com dois períodos contíguos;
- G_{i1} : conjunto de disciplinas do semestre i com um período de aula, de outros departamentos. $G_{i1} \subset M_{i1}$;
- G_{i2} : conjunto de disciplinas do semestre i com dois períodos de aula em dias diferentes, de outros departamentos. $G_{i2} \subset M_{i2}$;

- G_{i3} : conjunto de disciplinas do semestre i com dois períodos contíguos, de outros departamentos. $G_{i3} \subset M_{i3}$;
- H_{i1} : conjunto de matérias de alta repetência do semestre i , com um período de aula;
- H_{i2} : conjunto de matérias de alta repetência do semestre i , com dois períodos de aula em dias diferentes;
- H_{i3} : conjunto de matérias de alta repetência do semestre i , com dois períodos de aula contíguos;
- M_b : conjunto de disciplinas lecionadas pelo professor $b \in B$;
- D_2 : conjunto de dias em que as disciplinas com dois períodos de aula em dias diferentes podem ter a primeira aula alocada;
- P_2 : conjunto de períodos em que as disciplinas com dois períodos contíguos podem ter a primeira aula alocada;
- c : Custo por permitir tempo vago entre disciplinas;
- Q_{max} , Q_{min} : quantidades desejáveis, máxima e mínima, de períodos alocados a disciplinas em um mesmo dia. Assume-se que todos os dias possuem os mesmos valores para estas quantidades;
- A : penalidade alta aplicada quando a quantidade de períodos alocados a aulas no dia d for maior que zero e não estiver entre Q_{min} e Q_{max} ;
- S : penalidade paga sempre que uma disciplina de alta repetência for alocada no mesmo dia e horário que qualquer matéria do semestre seguinte.
- $F_{|m| \times |d| \times |p|}$: Matriz de preferências que indica a preferência do professor em lecionar a disciplina m no dia d e período p ;
- s_m : semestre s em que a disciplina m é lecionada;

Uma vez tendo sido definidos os aspectos anteriores, as variáveis de decisão usadas na estruturação do PL foram:

$$x_{imdp} = \begin{cases} 1, & \text{se a disciplina } m \in M_{i1} \text{ do semestre } i \text{ é alocada no dia } d \text{ e no período } p. \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

$$y_{imdp} = \begin{cases} 1, & \text{se a disciplina } m \in M_{i2} \text{ do semestre } i \text{ é alocada no dia } d \in D_2 \text{ e no período } p. \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

$$k_{imdp} = \begin{cases} 1, & \text{se a disciplina } m \in M_{i3} \text{ do semestre } i \text{ é alocada no dia } d \text{ e no período } p \in P_2. \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

$$s_{idp} = \begin{cases} 1, & \text{se alguma disciplina } m \in (M_{i1} \cup M_{i2} \cup M_{i3}) \text{ do semestre } i \text{ é alocada no dia } d \text{ e no período } p. \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

$$t_{id} = \begin{cases} 1, & \text{se a quantidade de períodos alocados no dia } d \text{ e semestre } i \text{ está entre } Q_{\min} \text{ e } Q_{\max}. \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

$$g_{id} = \begin{cases} 1, & \text{se a quantidade de períodos alocados no dia } d \text{ e semestre } i \text{ está no intervalo} \\ & [1, Q_{\min} - 1] \text{ ou } [Q_{\max} + 1, |P|]. \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

w_{id} : primeiro período com aula no dia d do semestre i .

z_{id} : último período com aula no dia d do semestre i .

v_{id} : quantidade de períodos vagos entre disciplinas no dia d do semestre i .

l_{imdp} : variável binária igual a um se no semestre i , a disciplina de alta repetência m foi alocada no dia d e período p , juntamente com alguma disciplina do semestre seguinte, não permitindo que o aluno que repetiu a matéria m possa fazê-la junto com todas as matérias do semestre seguinte.

Portanto, o modelo do problema estudado é representado matematicamente a função objetivo (FO) e as restrições como se segue:

$$\text{Min } Z = \sum_{i \in I} \left(\sum_{d \in D} cv_{id} - \sum_{m \in M_{i1}} \sum_{d \in D} \sum_{p \in P} f_{mdp} x_{imdp} - \sum_{m \in M_{i2}} \sum_{d \in D_2} \sum_{p \in P} f_{mdp} y_{imdp} - \sum_{m \in M_{i3}} \sum_{d \in D} \sum_{p \in P_2} f_{mdp} k_{imdp} + \sum_{d \in D} Ag_{id} + \sum_{d \in D} \sum_{p \in P} \sum_{m \in (H_{i1} \cup H_{i2} \cup H_{i3})} Sl_{imdp} \right) \quad (0)$$

Sujeito a:

$$\sum_{d \in D} \sum_{p \in P} x_{imdp} = 1 \quad \forall m \in M_{i1}, \forall i \in I \quad (1)$$

$$\sum_{d \in D_2} \sum_{p \in P} y_{imdp} = 1 \quad \forall m \in M_{i2}, \forall i \in I \quad (2)$$

$$\sum_{d \in D} \sum_{p \in P_2} k_{imdp} = 1 \quad \forall m \in M_{i3}, \forall i \in I \quad (3)$$

$$s_{idp} = \sum_{m \in M_{i1}} x_{imdp} + \sum_{m \in M_{i2}} (y_{imdp} + y_{imd-2p}) + \sum_{m \in M_{i3}} (k_{imdp} + k_{imd-1p}) \quad \forall i \in I, \forall d \in D, \forall p \in P \quad (4)$$

$$z_{id} \geq ps_{idp} \quad \forall i \in I, \forall d \in D, \forall p \in P \quad (5)$$

$$w_{id} \leq (|P| + 1) - (|P| + 1 - p)s_{idp} \quad \forall i \in I, \forall d \in D, \forall p \in P \quad (6)$$

$$1 + z_{id} - w_{id} - \sum_{p \in P} s_{idp} = v_{id} \quad \forall i \in I, \forall d \in D \quad (7)$$

$$\sum_{p \in P} s_{idp} \leq Q_{\max} t_{id} + |P| g_{id} \quad \forall i \in I, \forall d \in D \quad (8)$$

$$\sum_{p \in P} s_{idp} \geq Q_{\min} t_{id} + g_{id} \quad \forall i \in I, \forall d \in D \quad (9)$$

$$\sum_{m \in M_b} (x_{i_m mdp} + y_{i_m mdp} + y_{i_m m d-2p} + k_{i_m mdp} + k_{i_m m d p-1}) \leq 1 \quad \forall b \in B, \forall d \in D, \forall p \in P \quad (10)$$

$$x_{i m d p} = 1 \quad \forall i, m, d, p \in G_{i1}, \forall i \in I \quad (11)$$

$$y_{i m d p} = 1 \quad \forall i, m, d, p \in G_{i2}, \forall i \in I \quad (12)$$

$$k_{i m d p} = 1 \quad \forall i, m, d, p \in G_{i3}, \forall i \in I \quad (13)$$

$$x_{i m d p} + s_{(i+1) d p} \leq 1 + l_{i m d p} \quad \forall m \in H_{1i}, \forall i \in I, \forall d \in D, \forall p \in P \quad (14)$$

$$y_{i m d p} + s_{(i+1) d p} \leq 1 + l_{i m d p} \quad \forall m \in H_{2i}, \forall i \in I, \forall d \in D, \forall p \in P \quad (15)$$

$$y_{i m (d-2)p} + s_{(i+1) d p} \leq 1 + l_{i m d p} \quad \forall m \in H_{2i}, \forall i \in I, \forall d \in D, \forall p \in P \quad (16)$$

$$k_{i m d p} + s_{(i+1) d p} \leq 1 + l_{i m d p} \quad \forall m \in H_{3i}, \forall i \in I, \forall d \in D, \forall p \in P \quad (17)$$

$$k_{i m d (p-1)} + s_{(i+1) d p} \leq 1 + l_{i m d p} \quad \forall m \in H_{3i}, \forall i \in I, \forall d \in D, \forall p \in P \quad (18)$$

$$x_{i m d p} \in \{0, 1\} \quad \forall m \in M_{i1}, \forall i \in I, \forall d \in D, \forall p \in P, f_{m d p} \neq 0 \quad (19)$$

$$y_{i m d p} \in \{0, 1\} \quad \forall m \in M_{i2}, \forall i \in I, \forall d \in D_2, \forall p \in P, f_{m d p} \neq 0 \quad (20)$$

$$k_{i m d p} \in \{0, 1\} \quad \forall m \in M_{i3}, \forall i \in I, \forall d \in D, \forall p \in P_2, f_{m d p} \neq 0 \quad (21)$$

$$s_{i d p} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I, \forall d \in D, \forall p \in P \quad (22)$$

$$t_{i d} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I, \forall d \in D \quad (23)$$

$$l_{i m d p} \in \{0, 1\} \quad \forall m \in (H_{1i} \cup H_{2i} \cup H_{3i}), \forall i \in I, \forall d \in D, \forall p \in P \quad (24)$$

$$w_{i d}, v_{i d}, z_{i d} \geq 0 \quad \forall i \in I, \forall d \in D \quad (25)$$

A função objetivo (0) minimiza os custos de se ter períodos sem aula entre períodos com aula, e maximiza as preferências dos professores em relação aos períodos e dias em que lecionarão. A FO, também, minimiza os dias em que a quantidade de períodos com aula ou é

muito pequena, ou muito grande. As restrições (1) garantem que cada disciplina com apenas um período será alocada exatamente uma vez. As restrições (2) garantem que cada disciplina com dois períodos em dias diferentes será alocada exatamente uma vez. As restrições (3) garantem que cada disciplina com dois períodos contíguos será alocada exatamente uma vez. As restrições (4) garantem que se houver alguma aula alocada no dia d e período p , a variável s_{dp} será igual a 1. Zero, caso contrário. Estas restrições também garantem que em todo dia d e período p no máximo uma disciplina será alocada. Dependendo do dia e período, algumas das variáveis podem não existir, como, por exemplo, y_{imd-2p} para $d=1$. As restrições (5) calculam o último período de aula em cada dia d . As restrições (6) calculam o primeiro período de aula em cada dia d . As restrições (7) calculam a quantidade de períodos sem aula entre períodos com aula. As restrições (8) e (9) garantem para cada dia d que se a quantidade de períodos alocados a aulas estiver entre Q_{max} e Q_{min} , ou for zero, não haverá penalidade. Também garantem, juntamente com o quinto termo da função objetivo, que se a quantidade for maior que zero e menor que Q_{min} , ou maior que Q_{max} , haverá penalidade. As restrições (10) garantem que as aulas de semestres diferentes, dadas pelo mesmo professor, não serão alocadas no mesmo período e dia. Note que, dependendo do dia e período, algumas das variáveis podem não existir, como, por exemplo, y_{imd-2p} para $d=1$. As restrições (11) a (13) fixam os horários das disciplinas de outros departamentos. Ou seja, os horários destas disciplinas são dados de entrada do modelo. A restrição (14) verifica se a disciplina de alta repetência m , com um período de aula, foi alocada no mesmo dia e horário que alguma disciplina do semestre seguinte. As restrições (15) e (16) verificam se a disciplina de alta repetência m , com dois períodos de aula em dias diferentes, foi alocada no mesmo dia e horário que alguma disciplina do semestre seguinte. As restrições (17) e (18) verificam se a disciplina de alta repetência m , com dois períodos de aula contíguos, foi alocada no mesmo dia e horário que alguma disciplina do semestre seguinte. As restrições (19) a (24) declaram as variáveis binárias do modelo. A restrição (25) declara as variáveis contínuas não negativas do modelo.

6. Implementação e Resultados

Como já mencionado, neste trabalho a modelagem matemática foi acompanhada da implementação, com simulações para testar a consistência, usando a linguagem de programação VBA, o *software* MS Excel, e a biblioteca de funções UFFLP que chama o CPLEX (IBM, 2010a) como resolvidor.

No MS Excel criou-se duas planilhas eletrônicas, uma para armazenar os dados de entrada recolhidos após entrevistas com um representante da coordenação e do departamento do curso e outra para escrever a solução ótima encontrada. A primeira está mostrada de forma reduzida na Figura 1.

CÓDIGO	DISCIPLINAS	TURMA	PROFESSORES	SEMESTRES	TIPOS DE HORÁRIOS	Segunda					Terça									
						7h-9h	9h-11h	11h-13h	14h-16h	16h-18h	18h-20h	7h-9h	9h-11h	11h-13h	14h-16h	16h-18h	18h-20h			

Figura 1 - Representação resumida da planilha de dados de entrada.

Analisando a imagem da esquerda para direita, pode-se perceber as seguintes colunas preenchidas pelo usuário:

- Código: os códigos das disciplinas são escritos, este campo não é usado no modelo;

- Disciplinas: as disciplinas da graduação, específicas ou optativas, devem ser escritas mantendo-se atenção na ortografia, principalmente no caso de uma mesma disciplina for lecionada mais de uma vez em um mesmo período;
- Turma: as siglas de cada turma são colocadas;
- Professores: é preenchida com o nome dos professores para cada disciplina. Caso o professor ministre mais de uma aula é imprescindível que o nome do mesmo seja escrito de forma igual em todos os campos;
- Semestres: para o curso de Engenharia de Produção da UFF são 10 semestres, cada qual com seu conjunto de disciplinas, professores e horários. Este campo evita que disciplinas que possuem pré ou co-requisitos sejam alocadas em um mesmo período;
- Tipos de horários: aqui são considerados os três tipos já citados anteriormente. Quando a disciplina necessita de somente um período, escreve-se 1 na planilha. Quando a disciplina requerer dois períodos, e o professor preferir que estes horários estejam dispostos em dois dias diferentes, escreve-se 2 na planilha. Quando ocorrer o mesmo e o professor desejar dois períodos consecutivos em um mesmo dia, então escreve-se 3 na planilha.

Seguindo, observa-se as colunas com os dias da semana, aqui sendo representado somente segunda e terça feira, cada qual com o conjunto de períodos com duas horas cada, que inicia das sete horas da manhã e vai até as oito horas da noite, desconsiderando o horário de almoço. Estas colunas são preenchidas com as preferências dos professores para cada dia da semana em cada período deste dia. A ordem inicia-se em 0, quando existe indisponibilidade do profissional em ministrar a aula, indo até 5 quando ele deseja muito lecionar neste horário. Para evitar inviabilidade, o professor pode ser alocado no horário com preferência zero, mas a penalidade é alta. Na planilha existe uma legenda que explica a ordem de preferências.

Com a planilha de dados de entrada preenchida e o código redigido no VBA, pode-se acionar um comando no MS Excel para resolver o problema e posteriormente escrever a solução na planilha de horários representada de forma resumida na Figura 2.

1º SEMESTRE					
	Segunda	Terça	Quarta	Quinta	Sexta
7h - 9h					
9h - 11h					
11h - 13h					
14h - 16h					
16h - 18h					
18h - 20h					

Figura 2 - Representação resumida da planilha de horários.

7. Conclusão

Os conceitos abordados no projeto de pesquisa descrito neste artigo permitiram a construção de uma ferramenta de auxílio à decisão para alocação de disciplinas a horários, que foi utilizada pelo departamento de Engenharia de Produção da Universidade Federal Fluminense. O sistema criado possibilitou uma melhor alocação dos recursos humanos ao usar uma planilha eletrônica para a geração de uma grade horária flexível. Ao considerar as preferências dos docentes, pode-se influenciar na motivação dos mesmos, enquanto que a compactação da distribuição da carga horária durante a semana pode influenciar no desempenho dos alunos no que tange ao planejamento para a realização de atividades extracurriculares.

A grade horária resultante mostrou-se bastante satisfatória ao considerar os seguintes motivos. A flexibilidade do sistema, que apresenta uma solução ótima que pode ser modificada para melhor se adaptar à realidade e a facilidade de uso, por não exigir do manipulador um avançado conhecimento técnico. A variante temporal, posto que o sistema encontra uma solução ótima em menos de 20 segundos para o conjunto de professores e disciplinas apresentados, lembrando que o processo manual pode durar horas. Por fim, vale ressaltar que os valores apresentados podem variar conforme o peso dado aos diferentes objetivos.

A viabilidade do uso prático do modelo compilado no computador mostrou-se satisfatória, ao reduzir o tempo de geração de horas seguidas, para alguns segundos, com uma eficiência por volta de 93% em relação ao desejo dos docentes em lecionar disciplinas naquele dia e horário, a depender dos pesos escolhidos entre as preferências dos professores e a compactação do horário.

Este trabalho pode ser futuramente incrementado ao integrar a alocação de disciplinas a professores, e de disciplinas às salas de aula, formando assim um problema completo de *timetabling*. Outro aspecto a ser considerado em projetos posteriores é a construção de um modelo multicampi, tendo como parâmetros do modelo as relações entre disciplinas de distintos departamentos.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Departamento da Engenharia de Produção da Universidade Federal Fluminense pelo fornecimento de informações importantes para a realização deste projeto.

Referências

- Alves, R.; Delgado, C.** Programação linear inteira. Porto, Faculdade de Economia – Universidade do Porto. Apostila, 1997.
- Armentano, V. A.; Ronconi, D. P.** (2000) Minimização do tempo total de atraso no problema de *flowshop* com buffer zero através de busca tabu. *Gestão & Produção*, v. 7, n. 3, p. 352-363.
- De Oliveira, J. G.; Vianna, D. S.; Vianna, M. F. D.** (2012) Uma heurística GRASP+VND para o problema de programação de horário escolar. *Sistemas & Gestão*, v. 7, n. 3, p. 326-335.
- Glover, F.** (1989) Tabu search. Part I. *ORSA Journal on Computing*, 1 (3): 190-206.
- Góes, A. R. T.** *Otimização na distribuição da carga horária de professores: método exato, método heurístico, método misto e interface*. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia, Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2005.
- Lachtermacher, G.** *Pesquisa operacional na tomada de decisões: modelagem em Excel*. Rio de Janeiro: Campus, 2007.
- Marinho, E. H.; Ochi I. S.; Drummond, I. M. A.; Souza, M. J. F.; Silva, G. P.** Busca tabu aplicada ao problema de programação de tripulações de ônibus urbano. *Anais do XXXVI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, São João Del Rei, 2004.
- Montevecchi, J. A. B.** Pesquisa operacional II. Itajubá, Instituto de Engenharia de Produção e Gestão - Universidade Federal de Itajubá. Apostila. 2000.
- Pessoa, A.; Uchoa, E.** Integrando programação inteira mista e planilhas de cálculo. *Anais do XLIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, Ubatuba-SP, 2011.
- Thompson, J. M.; Dowsland, K. A.** (1996) Variants of simulated annealing for the examination timetabling problem. *Annals of Operations Research*, 63, p. 105-128.