

Formulations and Algorithms for Timetabling

George H.G. Fonseca

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Sistemas de Computação e Telecomunicações
Universidade Federal de Minas Gerais

Março de 2017



Sumário

- 1 Introdução
- 2 Programação de Horários
- 3 Formulações
- 4 Algoritmos
- 5 Experimentos Computacionais
- 6 Considerações Finais

Introdução

- Problema de Agendamento de Horários.
 - Alocar horários e recursos (professores, classes) a eventos respeitando diversas restrições.



Introdução

Prof. John

Seg	Ter	Qua	Qui	Sex
Fis₁ <i>ClassA</i>	Qui₁ <i>ClassA</i>	Bio₁ <i>ClassA</i>	Fis₁ <i>ClassC</i>	Bio₁ <i>ClassC</i>
Fis₂ <i>ClassA</i>	Qui₂ <i>ClassA</i>	Bio₂ <i>ClassA</i>	Fis₂ <i>ClassC</i>	Bio₂ <i>ClassC</i>
Bio₁ <i>ClassB</i>	Qui₃ <i>ClassA</i>	Bio₃ <i>ClassA</i>	Qui₁ <i>ClassB</i>	
Bio₂ <i>ClassB</i>	Fis₁ <i>ClassB</i>		Bio₂ <i>ClassB</i>	
Bio₃ <i>ClassB</i>	Fis₂ <i>ClassB</i>		Bio₃ <i>ClassB</i>	

Introdução

- Literatura recente.
 - Third International Timetabling Competition.
 - Metaheurísticas.
 - Programação Inteira (Kristiansen et al., 2014).
 - Heurísticas Matemáticas.



- Objetivos
 - Propor uma formulação alternativa ao problema.
 - Aprimorar as metaheurísticas existentes.
 - Desenvolver uma heurística matemática.



Programação de Horários

- Formato XHSTT: Horários, Recursos, Eventos e Restrições.
- A cada evento deve ser alocado um número de horários igual a sua duração e recursos demandados (professor, sala, etc)
- Restrições:

Assign Resource	Link Events
Assign Time	Order Events
Prefer Resources	Avoid Clashes
Prefer Times	Avoid Unavailable Times
Split Events	Limit Idle Times
Distribute Split Events	Cluster Busy Times
Avoid Split Assignments	Limit Busy Times
Spread Events	Limit Workload

Programação de Horários

Class E

Seg	Ter	Qua	Qui	Sex
Port ₁ <i>Anna</i>	Mat ₁ <i>Paul</i>	Port ₃ <i>Anna</i>	Mat ₃ <i>Paul</i>	Geog ₁ <i>Kate</i>
Port ₂ <i>Anna</i>	Mat ₂ <i>Paul</i>	Port ₄ <i>Anna</i>	Bio ₁ <i>John</i>	Geog ₂ <i>Kate</i>
Fis ₁ <i>John</i>	Hist ₁ <i>Kate</i>	Qui ₁ <i>John</i>	Bio ₂ <i>John</i>	Ing ₁ <i>Anna</i>
Fis ₂ <i>John</i>	Hist ₂ <i>Kate</i>	Qui ₂ <i>John</i>	Mat ₄ <i>Paul</i>	Ing ₂ <i>Anna</i>

Violação de restrição	Custo	Penalidade
Split Events (Duração = 2)	10	20

Programação de Horários

Prof. Anna

Seg	Ter	Qua	Qui	Sex
Port ₁ <i>ClassE</i>	Ing ₁ <i>ClassB</i>	Port ₃ <i>ClassE</i>	Port ₃ <i>ClassB</i>	
Port ₂ <i>ClassE</i>		Port ₄ <i>ClassE</i>	Port ₄ <i>ClassB</i>	
Ing ₁ <i>ClassA</i>			Port ₃ <i>ClassA</i>	Ing ₂ <i>ClassE</i>
Ing ₂ <i>ClassA</i>	Port ₂ <i>ClassB</i>	Port ₁ <i>ClassA</i>	Port ₄ <i>ClassA</i>	Ing ₂ <i>ClassE</i>
	Port ₂ <i>ClassB</i>	Port ₂ <i>ClassA</i>	Ing ₂ <i>ClassB</i>	

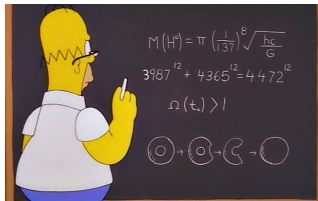
Violação de restrição	Custo	Penalidade
Limit Idle Times (No Idle Times)	5	15

Formulações

- Formulação Original.
- Formulação Alternativa.
 - Ligação alternativa entre x e y
 - Corte em Cluster Busy Times
 - Corte na ligação entre y e q
 - Corte no número de horários ocupados
 - Reformulação usando fluxo em redes
- Geração de Colunas

Formulação Original \mathcal{F}_1

- Conjuntos: $\mathcal{T}, \mathcal{TG}, \mathcal{R}, \mathcal{RG}, \mathcal{E}, \mathcal{EG}, \mathcal{C}$
- Enumera todas as possibilidades de quebra de um evento
 - Um evento $e \in \mathcal{E}$ de duração 4 ($D_e = 4$), gera sub-eventos com as seguintes durações: $\{1, 1, 1, 1, 2, 2, 3, 4\}$
- Variável principal: $x_{se,t,er,r} \in \{0, 1\}$
- Principais var. auxiliares
 - $u_{se} \in \{0, 1\}$
 - $y_{se,t} \in \{0, 1\}$
 - $w_{se,er,r} \in \{0, 1\}$
 - $v_{t,r} \in \mathbb{N}_0$
 - $q_{r,t} \in \{0, 1\}$
 - $p_{r,tg} \in \{0, 1\}$



Formulação Original \mathcal{F}_1

- Restrições para assegurar a consistência do modelo e ligar variáveis
- Restrições do problema (cada qual com variável de folga $s_{c,p,d}$)

$$\text{Ex.: } \sum_{t \in \mathcal{T}_c} q_{r,t} = s_{c,r}^{12} \quad \begin{array}{l} \forall c \in \mathcal{C}^{12} \\ \forall r \in \mathcal{R}_c \end{array} \quad (1)$$

- As violações são multiplicadas por um peso w_c
- Função objetivo: $\min z = f(s_{c,p,d}^1) \times w_c + \dots + f(s_{c,p,d}^{16}) \times w_c$
- Abordagem duas-etapas: Restrições fortes e depois restrições fracas

Formulação Alternativa \mathcal{F}_2

- Ligação Alternativa entre $x_{se,t,er,r}$ e $y_{se,t}$ (LXY)

~~$$\sum_{er \in \mathcal{ER}_{se}} \sum_{r \in \mathcal{R}_{er}} x_{se,t,er,r} = |\mathcal{ER}_{se}| \times y_{se,t} \quad \begin{matrix} \forall se \in \mathcal{SE} \\ \forall t \in \mathcal{T} \end{matrix} \quad (2)$$~~

$$x_{se,t,er,r} = y_{se,t} \quad \begin{matrix} \forall se \in \mathcal{SE} \\ \forall t \in \mathcal{T}, \\ \forall er \in \mathcal{ER}_{se}, \\ \forall r \in \mathcal{R}_{er} : r \in C^5 \vee C^5 = \emptyset \vee type_c \neq hard \end{matrix} \quad (3)$$

Formulação Alternativa \mathcal{F}_2

- Corte em Cluster Busy Times (CBT)

$$\sum_{tg \in TG_c} pr_{,tg} \geq \left[\frac{\sum_{\substack{e \in \mathcal{E}: \\ er \in \mathcal{ER}_e}} D_e}{\hat{\rho}_{er,r=1} \cdot \text{timesDay}} \right] \quad \begin{matrix} \forall c \in \mathcal{C}^{14} \\ \forall r \in \mathcal{R}_c \end{matrix} \quad (4)$$

Prof. Tom

Seg	Ter	Qua	Qui	Sex
Fis ₁ <i>ClassA</i>	Qui ₁ <i>ClassA</i>	Bio ₁ <i>ClassA</i>		
Fis ₂ <i>ClassA</i>	Qui ₂ <i>ClassA</i>			
Bio ₁ <i>ClassB</i>	Qui ₃ <i>ClassA</i>			
Bio ₂ <i>ClassB</i>	Fis ₁ <i>ClassB</i>			
Bio ₃ <i>ClassB</i>	Fis ₂ <i>ClassB</i>			

Formulação Alternativa \mathcal{F}_2

- Corte na Ligação entre $y_{se,t}$ e $q_{r,t}$ (LYQ)

$$q_{r,t} \leq \sum_{\substack{se \in \mathcal{SE} \\ r \in er \in \mathcal{ER}_{se} \wedge \\ r \in c \in C^5 \vee C^5 = \emptyset \vee type_c \neq hard}} y_{se,t} \quad \forall r \in \mathcal{R} \\ \forall t \in T \setminus \{t_D\} \quad (5)$$

Se um recurso r está ocupado em um horário $t \rightarrow$
um dos sub-eventos que podem ser alocados a r será alocado em t

Formulação Alternativa \mathcal{F}_2

- Corte no número de horários ocupados (NBT)

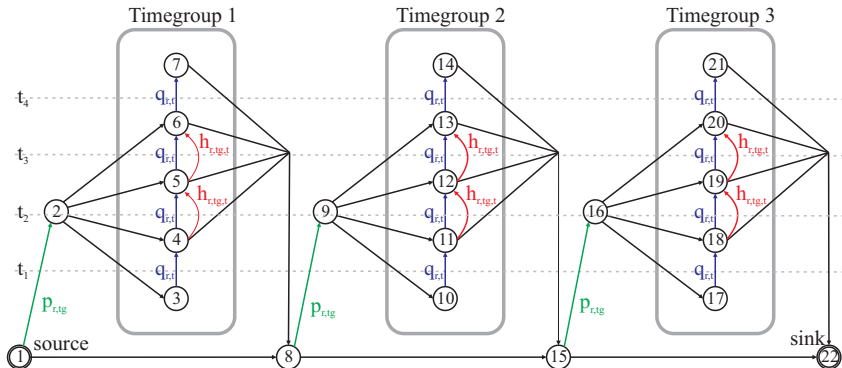
$$\sum_{t \in \mathcal{T}} q_{r,t} = \sum_{\substack{e \in \mathcal{E}: \\ er \in \mathcal{ER}_e \wedge \hat{\rho}_{er,r} = 1}} D_e \quad \forall r \in \mathcal{R} \quad (6)$$

Se r for eligível a mais alocações:

$$\sum_{t \in \mathcal{T}} q_{r,t} \geq \sum_{\substack{e \in \mathcal{E}: \\ er \in \mathcal{ER}_e \wedge \hat{\rho}_{er,r} = 1}} D_e \quad \forall r \in \mathcal{R}: \\ \exists c \in \mathcal{C}^1 \mid \text{type}_r = \text{roleType}(\text{role}_c) \quad (7)$$

Formulação Alternativa \mathcal{F}_2

- Reformulação usando Fluxo em Redes (MCF) (Dorneles et al., 2017)



Geração de Colunas

- Restrições ligadas aos recursos → *Pricing*
- Demais restrições → *Master*
- Exemplo de Padrão (Coluna)

Prof. Smith

Seg	Ter	Qua	Qui	Sex
✓	✓	✓	✓	✓
✓	✓		✓	✓
	✓	✓	✓	
✓	✓	✓	✓	
✓	✓	✓	✓	

Algoritmos

- 1 Algoritmo Construtivo: KHE
 - 1 Fase Estrutural
 - 2 Alocação de Horários
 - 3 Alocação de Recursos

- 2 Metaheurísticas
 - Estrutura de vizinhança
 - VNS
 - LAHC

- 3 Heurísticas Matemáticas
 - Fixa-e-Otimiza
 - Fixa-e-Otimiza Orientado a Defeitos

Algoritmo Construtivo (Kingston, 2014)

- Fase Estrutural
 - Quebra os eventos em sub-eventos e limita os recursos e horários que podem ser alocados aos eventos
- Alocação de Horários
 - Os recursos são ordenados de acordo com a “dificuldade” de alocar
 - Para cada recurso, é resolvido um matching em grafos - de um lado horários e de outro os sub-eventos que o recurso atende
 - O custo das arestas calculado de acordo com o custo de FO da alocação
- Alocação de Recursos
 - Eventos são ordenados de acordo com a quantia de recursos disponíveis (quanto menor, mais prioritário)
 - Para cada evento, escolhe-se o recurso que incorre menor custo de FO

Estrutura de Vizinhança

- Algoritmos heurísticos otimizam uma solução iterativamente através de pequenas modificações em uma solução inicial s_0
- Soluções resultantes dessas modificações são denotadas vizinhos de s_0
- Gera um vizinho de acordo com um de seis possíveis movimentos
 - 1 Event Swap (0,20)
 - 2 Event Move (0,38)
 - 3 Event Block Move (0,10)
 - 4 Resource Swap (0,20)
 - 5 Resource Move (0,10)
 - 6 Kempe Chain (0,02)

Estrutura de Vizinhança

- Event Swap

Class A				
Seg	Ter	Qua	Qui	Sex
Mat ₁	Port ₁	Mat ₂	Fis ₁	Port ₂
Anna	John	Anna	Paul	John
Mat ₁	Port ₁	Mat ₂	Fis ₁	Port ₂
Anna	John	Anna	Paul	John
Mat ₁	Qui ₁	Geog ₂	Ing ₁	Port ₂
Anna	Sara	Mark	Gary	John
Geog ₁	Qui ₁	His ₁	Ing ₁	Fis ₂
Mark	Sara	Mark	Gary	Paul
Geog ₁	Qui ₁	His ₁	His ₂	
Mark	Sara	Mark	Mark	

ES
(Eng₁, Span₁)
⇒

Class A				
Seg	Ter	Qua	Qui	Sex
Mat ₁	Ing ₁	Mat ₂	Fis ₁	Port ₂
Anna	Gary	Anna	Paul	John
Mat ₁	Ing ₁	Mat ₂	Fis ₁	Port ₂
Anna	Gary	Anna	Paul	John
Mat ₁	Qui ₁	Geog ₂	Port ₁	Port ₂
Anna	Sara	Mark	John	John
Geog ₁	Qui ₁	His ₁	Port ₁	Fis ₂
Mark	Sara	Mark	John	Paul
Geog ₁	Qui ₁	His ₁	His ₂	
Mark	Sara	Mark	Mark	

Estrutura de Vizinhança

- Event Move

Class A

Seg	Ter	Qua	Qui	Sex
Mat ₁	Port ₁	Mat ₂	Fis ₁	Port ₂
Anna	John	Anna	Paul	John
Mat ₁	Port ₁	Mat ₂	Fis ₁	Port ₂
Anna	John	Anna	Paul	John
Mat ₁	Qui ₁	Geog ₂	Ing ₁	Port ₂
Anna	Sara	Mark	Gary	John
Geog ₁	Qui ₁	His ₁	Ing ₁	Fis ₂
Mark	Sara	Mark	Gary	Paul
Geog ₁	Qui ₁	His ₁	His ₂	
Mark	Sara	Mark	Mark	

EM
(Geog₂, Fri₅)
⇒

Class A

Seg	Ter	Qua	Qui	Sex
Mat ₁	Port ₂	Mat ₂	Fis ₁	Port ₂
Anna	John	Anna	Paul	John
Mat ₁	Port ₁	Mat ₂	Fis ₁	Port ₂
Anna	John	Anna	Paul	John
Mat ₁	Qui ₁		Ing ₁	Port ₂
Anna	Sara		Gary	John
Geog ₁	Qui ₁	His ₁	Ing ₁	Fis ₂
Mark	Sara	Mark	Gary	Paul
Geog ₁	Qui ₁	His ₁	His ₂	Geog ₂
Mark	Sara	Mark	Mark	Mark

Estrutura de Vizinhança

- Event Block Move

Class A

Seg	Ter	Qua	Qui	Sex
Mat ₁	Port ₁	Mat ₂	Fis ₁	Port ₂
Anna	John	Anna	Paul	John
Mat ₁	Port ₁	Mat ₂	Fis ₁	Port ₂
Anna	John	Anna	Paul	John
Mat ₁	Qui ₁	Geog ₂	Ing ₁	Port ₂
Anna	Sara	Mark	Gary	John
Geog ₁	Qui ₁	His ₁	Ing ₁	Fis ₂
Mark	Sara	Mark	Gary	Paul
Geog ₁	Qui ₁	His ₁	His ₂	
Mark	Sara	Mark	Mark	

EBS
(Math₂, Geog₂)
⇒

Class A

Seg	Ter	Qua	Qui	Sex
Mat ₁	Port ₂	Geog ₂	Fis ₁	Port ₂
Anna	John	Mark	Paul	John
Mat ₁	Port ₁	Mat ₂	Fis ₁	Port ₂
Anna	John	Anna	Paul	John
Mat ₁	Qui ₁	Mat ₂	Ing ₁	Port ₂
Anna	Sara	Anna	Gary	John
Geog ₁	Qui ₁	His ₁	Ing ₁	Fis ₂
Mark	Sara	Mark	Gary	Paul
Geog ₁	Qui ₁	His ₁	His ₂	
Mark	Sara	Mark	Mark	

Estrutura de Vizinhança

- Resource Swap

Class A				
Seg	Ter	Qua	Qui	Sex
Mat ₁	Port ₁	Mat ₂	Fis ₁	Port ₂
Anna	John	Anna	Paul	John
Mat ₁	Port ₁	Mat ₂	Fis ₁	Port ₂
Anna	John	Anna	Paul	John
Mat ₁	Qui ₁	Geog ₂	Ing ₁	Port ₂
Anna	Sara	Mark	Gary	John
Geog ₁	Qui ₁	His ₁	Ing ₁	Fis ₂
Mark	Sara	Mark	Gary	Paul
Geog ₁	Qui ₁	His ₁	His ₂	
Mark	Sara	Mark	Mark	

RS
(Chem₁, Phis₁)
⇒

Class A				
Seg	Ter	Qua	Qui	Sex
Mat ₁	Port ₁	Mat ₂	Fis ₁	Port ₂
Anna	John	Anna	Sara	John
Mat ₁	Port ₁	Mat ₂	Fis ₁	Port ₂
Anna	John	Anna	Sara	John
Mat ₁	Qui ₁	Geog ₂	Ing ₁	Port ₂
Anna	Paul	Mark	Gary	John
Geog ₁	Qui ₁	His ₁	Ing ₁	Fis ₂
Mark	Paul	Mark	Gary	Paul
Geog ₁	Qui ₁	His ₁	His ₂	
Mark	Paul	Mark	Mark	

Estrutura de Vizinhança

• Resource Move

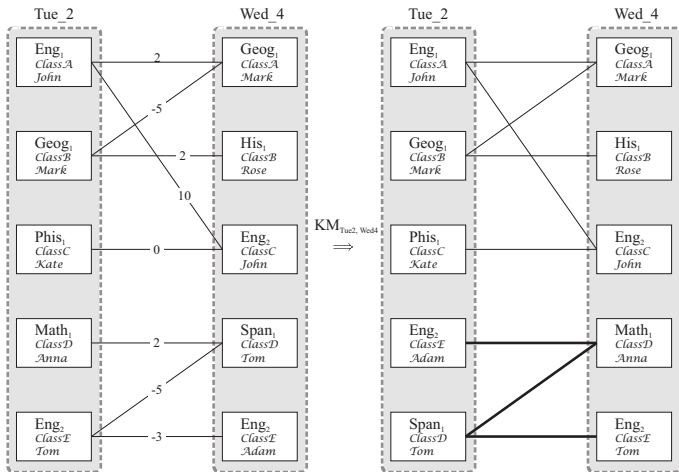
Class A				
Seg	Ter	Qua	Qui	Sex
Mat ₁	Port ₁	Mat ₂	Fis ₁	Port ₁
Anna	John	Anna	Paul	John
Mat ₁	Port ₁	Mat ₂	Fis ₁	Port ₂
Anna	John	Anna	Paul	John
Mat ₁	Qui ₁	Geog ₂	Ing ₁	Port ₂
Anna	Sara	Mark	Gary	John
Geog ₁	Qui ₁	His ₁	Ing ₁	Fis ₂
Mark	Sara	Mark	Gary	Paul
Geog ₁	Qui ₁	His ₁	His ₂	
Mark	Sara	Mark	Mark	
Compatible:		Tom	Joey	Kate

RM
(Span₁, Kate)
⇒

Class A				
Seg	Ter	Qua	Qui	Sex
Mat ₁	Port ₂	Mat ₂	Fis ₁	Port ₂
Anna	John	Anna	Paul	John
Mat ₁	Port ₁	Mat ₂	Fis ₁	Port ₂
Anna	John	Anna	Paul	John
Mat ₁	Qui ₁	Geog ₂	Ing ₁	Port ₂
Anna	Sara	Mark	Kate	John
Geog ₁	Qui ₁	His ₁	Ing ₁	Fis ₂
Mark	Sara	Mark	Kate	Paul
Geog ₁	Qui ₁	His ₁	His ₂	
Mark	Sara	Mark	Mark	
Compatible:		Tom	Joey	Gary

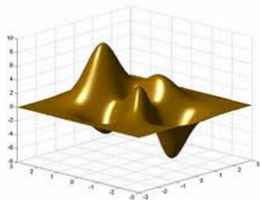
Estrutura de Vizinhança

- Kempe Chain



Metaheurísticas

- Variable Neighborhood Search (VNS)
 - A cada iteração uma vizinhança k é selecionada
 - Gera-se um vizinho $s' \in N_k(s)$ e executa-se o método de descida sobre o mesmo, gerando uma solução s''
 - Note que s' pode ser pior que s porém s'' pode ainda ser melhor que s

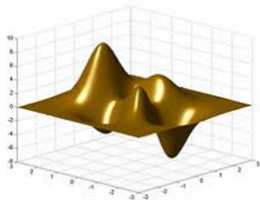


Metaheurísticas

- Variable Neighborhood Search - Variações
 - Reduced VNS (RVNS)
 - Sem método de descida.
 - Sequential Variable Neighborhood Descent (SVND)
 - Método de descida considera apenas um tipo de vizinhança.
 - Skewed VNS (SVNS)
 - Regra relaxada de aceitação de vizinho.

Metaheurísticas

- Late Acceptance Hill Climbing (LAHC)
 - Armazena-se uma lista l de fitness da solução corrente na iteração i
 - Compara-se um vizinho $s' \in N(s)$ com o valor armazenado em l_i a $|l|$ iterações



Metaheurísticas

- Late Acceptance Hill Climbing - Variações
 - Stagnation Free LAHC (SF-LAHC)
 - Após n iterações sem atualização da lista, restaura estado anterior.
 - Simulated Annealing - LAHC (SA-LAHC)
 - Invoca Simulated Annealing e, após o resfriamento, invoca o LAHC.

Fixa-e-Otimiza

- Seleciona aleatoriamente n recursos $r \in \mathcal{R}$
- Todas as variáveis do modelo que não estão relacionadas a nenhum recurso selecionado são fixadas
- Otimiza modelo de PI sobre as variáveis restantes
- Ajusta n se necessário

Fixa-e-Otimiza

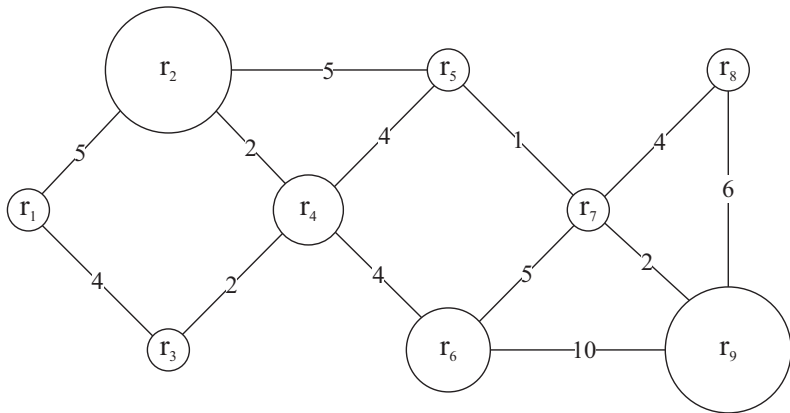
Class A				
Seg	Ter	Qua	Qui	Sex
Port ₁	Ing ₂	Mat ₁	Qui ₁	Mat ₂
John	John	Anna	Kate	Anna
Port ₁	Ing ₂	Mat ₁	Qui ₁	Phi ₁
John	John	Anna	Kate	Kate
Ing ₁	Port ₂	Bio ₁	Prog ₁	Mat ₃
John	John	Kate	Anna	Anna
Ing ₁	Port ₂	Bio ₁	Prog ₁	Fis ₂
John	John	Kate	Anna	Kate

Fix-Opt
{Anna, Kate}
⇒

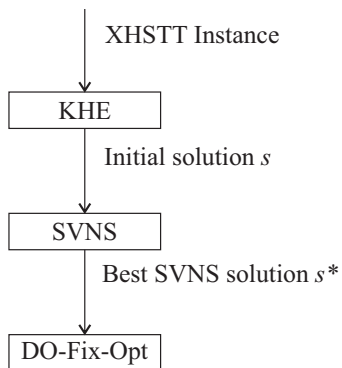
Class A				
Seg	Ter	Qua	Qui	Sex
Port ₁	Ing ₂	Mat ₁	Mat ₂	Qui ₁
John	John	Anna	Anna	Kate
Port ₁	Ing ₂	Mat ₁	Mat ₃	Qui ₂
John	John	Anna	Anna	Kate
Ing ₁	Port ₂	Bio ₁	Prog ₁	Phi ₁
John	John	Kate	Anna	Kate
Ing ₁	Port ₂	Bio ₁	Prog ₁	Fis ₂
John	John	Kate	Anna	Kate

Fixa-e-Otimiza Orientado a Defeitos

- Estratégia mais elaborada para seleção dos recursos:



Resolvedor Híbrido



Experimentos Computacionais

- Ambiente computacional
- Caracterização das instâncias
- Resultados das formulações
- Resultados dos algoritmos
- Comparação de resolvedores
- Novos limites obtidos

Ambiente Computacional

- Intel[®] i7 4510U 2.6 Ghz PC
- 8GB Memória RAM
- Ubuntu 12.04
- C++ e compilado pelo GCC 4.6.1
- Resultados validados¹
- Gurobi 6.5.1

¹<http://sydney.edu.au/engineering/it/~jeff/hseval.cgi>

Caracterização das Instâncias - XHSTT-ITC-2011

Abrev.	Instância	Horários	Recursos	Eventos	Duração
BR-SA-00	BrazilInstance2	25	20	63	150
BR-DF-89	BrazilInstance3	25	24	69	200
BR-SM-00	BrazilInstance4	25	35	127	300
BR-SN-00	BrazilInstance6	25	44	140	350
FI-ES-12	FinlandElementarySchool	35	103	291	445
FI-SS-06	FinlandSecondarySchool2	40	79	469	566
GR-HS-11	AigioFirstHighSchool10-11	35	245	283	532
IT-IA-96	Italy_Instance4	36	99	748	1101
KS-PR-11	KosovoInstance1	62	164	809	1912
NL-KP-03	Kottenpark2003	38	587	1156	1203
NL-KP-05	Kottenpark2005	37	644	1235	1272
NL-KP-08	Kottenpark2008	40	126	1047	1118
NL-KP-09	Kottenpark2009	38	194	1166	1301
ZA-WD-09	Woodlands2009	42	70	278	1353
ES-SS-08	SpanishSchool	35	91	225	439
GR-P3-08	WesternGreeceUniversity3	35	25	210	210
GR-PA-08	WesternGreeceUniversity4	35	31	262	262
GR-P5-08	WesternGreeceUniversity5	35	24	184	184

Caracterização das Instâncias - XHSTT-2014

Instância	Horários	Recursos	Eventos	Duração
AU-BG-98	40	131	387	1564
AU-SA-96	60	99	296	1876
AU-TE-99	30	76	308	806
BR-SA-00	25	20	63	150
BR-SM-00	25	35	127	300
BR-SN-00	25	44	140	350
DK-FG-12	50	438	1077	1077
DK-HG-12	50	694	1235	1235
DK-VG-09	60	262	918	918
ES-SS-08	35	91	225	439
FI-PB-98	40	111	387	854
FI-WP-06	35	41	172	297
FI-MP-06	35	64	280	306
GR-H1-97	35	95	372	372
GR-P3-10	35	114	178	340
GR-PA-08	35	31	262	262
IT-I4-96	36	99	748	1101
KS-PR-11	62	164	809	1912
NL-KP-03	38	587	1156	1203
NL-KP-05	37	644	1235	1272
NL-KP-09	38	194	1148	1274
UK-SP-06	25	202	1227	1227
US-WS-09	100	242	628	6354
ZL-LW-09	148	37	185	838
ZL-WL-09	42	70	278	1353

Comparação de \mathcal{F}_1 e \mathcal{F}_2

- Efetividade dos Cortes

Instance	NBT	LXY	MCF	LYQ	CBT
BR-SA-00	✓	✓	✓		✓
BR-DF-89	✓	✓	✓		✓
BR-SM-00	✓	✓	✓		✓
BR-SN-00	✓	✓	✓		✓
FI-ES-12	✓	✓			
FI-SS-06	✓	✓	✓		
GR-HS-11	✓	✓	✓	✓	
IT-I4-96	✓	✓	✓	✓	
KS-PR-11	✓	✓	✓		
NL-KP-03	✓	✓	✓	✓	✓
NL-KP-05	✓	✓	✓	✓	✓
NL-KP-08	✓	✓	✓	✓	✓
NL-KP-09	✓	✓	✓	✓	✓
ZA-WD-09	✓	✓		✓	
ES-SS-08	✓	✓		✓	
GR-P3-08	✓	✓	✓		
GR-PA-08	✓	✓	✓	✓	
GR-P5-08	✓	✓	✓		

Comparação de \mathcal{F}_1 e \mathcal{F}_2

- Relaxações Lineares

Instance	UB	Time (s)		LB		\downarrow Gap
		\mathcal{F}_1	\mathcal{F}_2	\mathcal{F}_1	\mathcal{F}_2	
BR-SA-00	5*	0.2	0.4	0.5	4.0	70%
BR-DF-89	24*	0.2	0.4	0.0	2.0	8%
BR-SM-00	51*	0.5	1.1	8.0	32.5	48%
BR-SN-00	35*	2.5	4.4	2.0	16.0	40%
FI-ES-12	3*	6.1	10.9	0.0	0.0	0%
IT-I4-96	27*	15.8	25.6	0.0	15.0	56%
NL-KP-03	420	28147.0	10320.1	0.0	0.0	0%
NL-KP-05	784	31756.3	17879.5	0.0	86.0	11%
NL-KP-08	15463	35.5	35.1	2.3	2904.0	19%
NL-KP-09	5095	3115.6	8751.9	0.1	179.0	4%
ES-SS-08	335	24.4	23.4	54.9	305.0	75%
GR-P3-08	5*	1.8	2.3	2.0	5.0	60%
GR-PA-08	3*	6.5	3.4	0.0	0.0	0%

Comparação de \mathcal{F}_1 e \mathcal{F}_2

- Modelo de Programação Inteira

Instance	\mathcal{F}_1			\mathcal{F}_2		
	LB	UB	Gap	LB	UB	Gap
BR-SA-00	4.5	10	0.55	5.0*	5*	0.00
BR-DF-89	21.3	24	0.11	24.0*	24*	0.00
BR-SM-00	49.7	138	0.64	51.0*	51*	0.00
BR-SN-00	17.5	224	0.92	35.0*	217	0.84
FI-ES-12	3.0*	3*	0.00	2.7	4	0.33
GR-HS-11	0.0*	0*	0.00	0.0*	0*	0.00
IT-I4-96	27.0*	11,244	1.00	27.0*	15,348	1.00
GR-P3-08	5.0*	9	0.44	5.0*	6	0.17
GR-PA-08	0.0	24	1.00	2.0	8	0.75
GR-P5-08	0.0*	0*	0.00	0.0*	0*	0.00

Resultados VNS

Instance	KHE14	RVNS	SVND	VNS	SVNS
BR-SA-00	44.0	44.0	42.2	33.8	29.0
BR-DF-89	109.0	109.0	109.0	106.6	104.8
BR-SM-00	(12.0, 128.0)	(12.0, 119.0)	(9.6, 111.8)	(6.4, 113.0)	(6.4, 110.6)
BR-SN-00	145.0	145.0	145.0	123.4	121.0
FI-ES-12	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
FI-SS-06	18.0	18.0	8.0	0.0	0.0
GR-HS-11	10.0	10.0	9.6	0.8	0.8
IT-I4-96	54.0	54.0	53.8	50.6	50.2
KS-PR-11	20.0	20.0	20.0	13.0	13.8
NL-KP-03	1515.0	1419.4	1329.6	1474.8	1384.4
NL-KP-05	(19.2, 5758.2)	(15.4, 6144.0)	(15.4, 6549.2)	(18, 5399.0)	(13.8, 6812.4)
NL-KP-08	(25.0, 26861.0)	(19.4, 28299.4)	(19.8, 34548.4)	(15.6, 28114.8)	(15.4, 31039.4)
NL-KP-09	(16.0, 7930.0)	(13.4, 28781.0)	(12.4, 26085.0)	(11.0, 12793.0)	(11.0, 12995.0)
ZA-WD-09	(26.0, 0.0)	(25.0, 0.0)	(23.4, 0.0)	(6.8, 0.0)	(7.0, 0.0)
ES-SS-08	1117.0	1117.0	1112.0	959.6	959.6
GR-P3-08	10.0	10.0	10.0	5.0	5.0
GR-PA-08	16.0	16.0	16.0	5.0	5.2
GR-P5-08	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Ranking	4.36	3.81	3.22	2.00	1.61

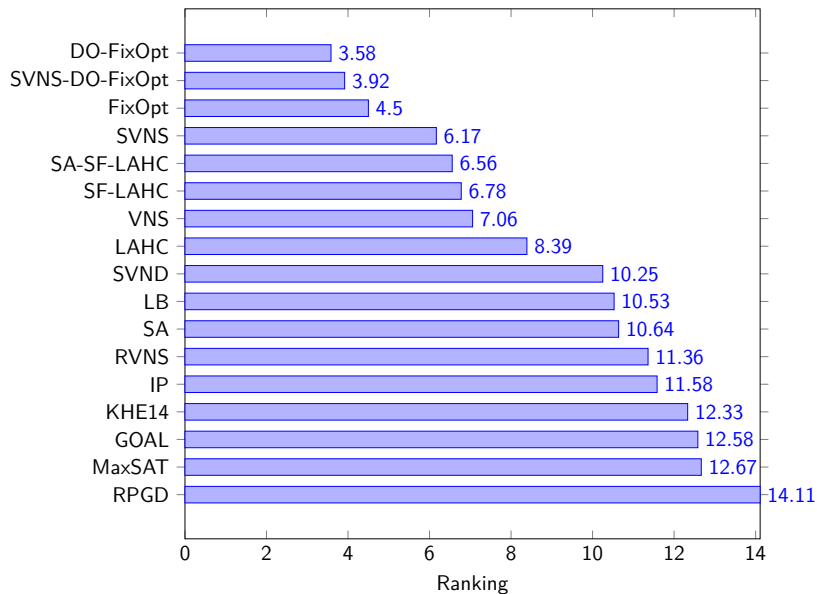
Resultados LAHC

Instance	KHE14	SA	LAHC	SF-LAHC	SA-SF-LAHC
BR-SA-00	44.0	44.0	34.4	33.8	32.0
BR-DF-89	109.0	108.4	109.0	109.0	109.0
BR-SM-00	(12.0, 128.0)	(4.8, 156.8)	(8.0, 116.6)	(7.6, 111.2)	(5.6, 139.4)
BR-SN-00	145.0	145.0	130.0	112.6	114.4
FI-ES-12	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
FI-SS-06	18.0	18.0	0.0	0.0	0.0
GR-HS-11	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0
IT-I4-96	54.0	54.0	40.8	37.4	39.0
KS-PR-11	20.0	20.0	8.0	8.6	7.6
NL-KP-03	1515.0	1345.2	1528.4	1290.6	1390.6
NL-KP-05	(19.2, 5758.2)	(15.2, 9924.8)	(14.8, 7670.0)	(14.8, 6730.4)	(14.4, 9090.0)
NL-KP-08	(25.0, 26861.0)	(25.0, 26861.0)	(25.0, 26861.0)	(25.0, 26861.0)	(25.0, 26861.0)
NL-KP-09	(16.0, 7930.0)	(16.0, 7930.0)	(16.0, 7930.0)	(16.0, 7930.0)	(16.0, 7930.0)
ZA-WD-09	(26.0, 0.0)	(8.0, 0.0)	(6.2, 0.0)	(7.2, 0.0)	(6.2, 0.0)
ES-SS-08	1117.0	1117.0	954.0	960.0	929.0
GR-P3-08	10.0	10.0	5.2	5.0	5.0
GR-PA-08	16.0	16.0	5.8	4.4	4.8
GR-P5-08	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Ranking	4.06	3.47	2.94	2.33	2.14

Resultados Heurísticas Matemáticas

Instance	KHE14	LB	Fix-Opt	DO-FixOpt	SVNS-DO-FixOpt
BR-SA-00	44.0	16.0	5.0	5.0	5.0
BR-DF-89	109.0	98.0	27.2	27.6	26.6
BR-SM-00	(12.0, 128.0)	122.0	69.0	68.4	65.8
BR-SN-00	145.0	145.0	53.4	45.4	43.6
FI-ES-12	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
FI-SS-06	18.0	18.0	0.0	0.0	0.0
GR-HS-11	10.0	10.0	0.0	0.0	0.0
IT-I4-96	54.0	52.0	27.8	27.0	27.0
KS-PR-11	20.0	20.0	7.8	3.4	4.6
NL-KP-03	1515.0	1515.0	1399.6	1297.2	1421.8
NL-KP-05	(19.2, 5758.2)	(22.0, 5139.0)	(16.8, 7381.6)	(17.0, 6817.0)	(18.6, 7249.8)
NL-KP-08	(25.0, 26861.0)	(25.0, 26861.0)	(17.8, 117602.4)	(14.8, 125873.2)	(14.2, 105092.6)
NL-KP-09	(16.0, 7930.0)	(16.0, 7930.0)	(16.2, 26435.0)	(16.4, 25717.0)	(12.8, 14136.0)
ZA-WD-09	(26.0, 0.0)	(26.0, 0.0)	25.8	17.8	14.4
ES-SS-08	1117.0	1112.0	655.8	493.0	494.0
GR-P3-08	10.0	10.0	5.0	5.0	5.0
GR-PA-08	16.0	15.0	5.0	4.6	4.6
GR-P5-08	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Ranking	4.44	4.22	2.61	2.00	1.72

Comparação de resolvedores



Otimizando melhores soluções conhecidas

Instance			New LB		New UB	
	LB	UB	IP F_2	BKS-HS	KHE-HS	
AU-BG-98	0	(1, 386)	0	126	(2, 398)	
AU-SA-96	0	24	0*	0*	(3, 21)	
AU-TE-99	0	125	20*	20*	(1, 36)	
BR-SA-00	5	5	-	-	5*	
BR-SM-00	51	51	-	-	51*	
BR-SN-00	35	35	-	-	35*	
DK-FG-12	285	3310	412	1263	1668	
DK-HG-12	(7, 0)	(12, 3124)	(7, 0)	(12, 2330)	(12, 3371)	
DK-VG-09	(0, 0)	(2, 4097)	(2, 0)	(2, 2323)	(2, 2765)	
ES-SS-08	334	335	334	335	351	
FI-PB-98	0	0	-	-	0*	
FI-WP-06	0	1	0*	0*	2	
FI-MP-06	77	83	77	77*	77*	
GR-H1-97	0	0	-	-	0*	
GR-P3-10	0	0	-	-	0*	
GR-PA-08	3	4	3	3*	3*	
IT-I4-96	27	34	27	27*	27*	
KS-PR-11	0	0	-	-	0*	
NL-KP-03	0	617	0	199	1103	
NL-KP-05	89	1078	89	425	(8, 4460)	
NL-KP-09	170	9180	180	1620	(7, 64470)	
UK-SP-06	0	(16, 2258)	0	(5, 4014)	(53, 1524)	
US-WS-09	0	697	0	103	(124)	
ZA-LW-09	0	0	-	-	0*	
ZA-WD-09	0	0	-	-	0*	

Considerações Finais

- Contribuições
 - Uma formulação \mathcal{F}_2 mais forte para timetabling.
 - Uma abordagem de geração de colunas para XHSTT.
 - Abordagem fixa-e-otimiza específica para programação de horários educacionais.
 - Desenvolvimento de uma nova abordagem para seleção de variáveis no esquema fixa-e-otimiza.
 - Implementação de várias metaheurísticas e novas variações.

Trabalhos Futuros

- Desenvolvimento de uma interface gráfica para XHSTT.
- Codificar e solucionar outros problemas de programação de horários em XHSTT.
- Desenvolver novas abordagens de decomposição para agendamento de horários.

Publicações

- George H.G. Fonseca, Haroldo G. Santos, Eduardo G. Carrano, and Thomas J.R. Stidsen. Integer Programming Techniques for Educational Timetabling. **European Journal of Operations Research**, 2017.
- George H.G. Fonseca, Eduardo G. Carrano, and Haroldo G. Santos. Integrating matheuristics and metaheuristics for timetabling. **Computers & Operations Research**, pages 108–117, 2016.
- George H.G. Fonseca, Haroldo G. Santos, and Eduardo G. Carrano. Late acceptance hill-climbing for high school timetabling. **Journal of Scheduling**, pages 1–13, 2015.
- George H.G. Fonseca, Haroldo G. Santos, Eduardo G. Carrano, and Thomas J.R. Stidsen. Modelling and Solving University Course Timetabling Problems Through XHSTT. In **Proceedings of the 10th Conference on Practice and Theory of Automated Timetabling**, PATAT'16, pages 127–138, 2016.
- George H.G. Fonseca, Eduardo G. Carrano, and Haroldo G. Santos. Improving upper bounds in high school timetabling by matheuristics. In **Proceedings of the 7th Multidisciplinary International Conference on Scheduling: Theory and Applications**, MISTA'15, pages 267–275, 2015.

Referências

- Árton P. Dorneles, Olinto C.B. de Araújo, and Luciana S. Buriol. A column generation approach to high school timetabling modeled as a multicommodity flow problem. *European Journal of Operational Research*, 256(3):685 – 695, 2017. ISSN 0377-2217.
- Jeffrey H Kingston. KHE14: An algorithm for high school timetabling. In *10th International Conference of the Practice and Theory of Automated Timetabling (PATAT 2014)*, York, United Kingdom, pages 26–29, 2014.
- Simon Kristiansen, Matias Sørensen, and Thomas R. Stidsen. Integer programming for the generalized high school timetabling problem. *Journal of Scheduling*, pages 1–16, 2014. ISSN 1094-6136.

Agradecimentos

UF *m* G



Perguntas



THE BEST THESIS DEFENSE IS A GOOD THESIS OFFENSE.