

Inteligência Computacional para Otimização

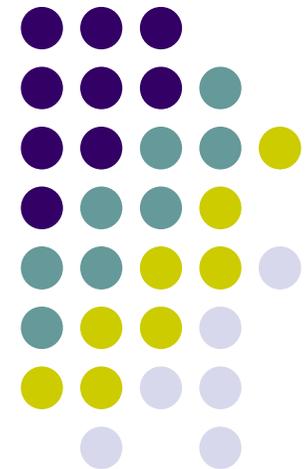
Marcone Jamilson Freitas Souza

Departamento de Computação

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral / UFOP

Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática e
Computacional / CEFET-MG

<http://www.iceb.ufop.br/prof/marcone>

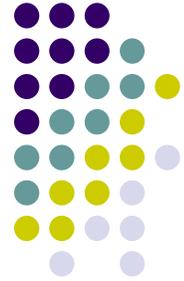


Ementa



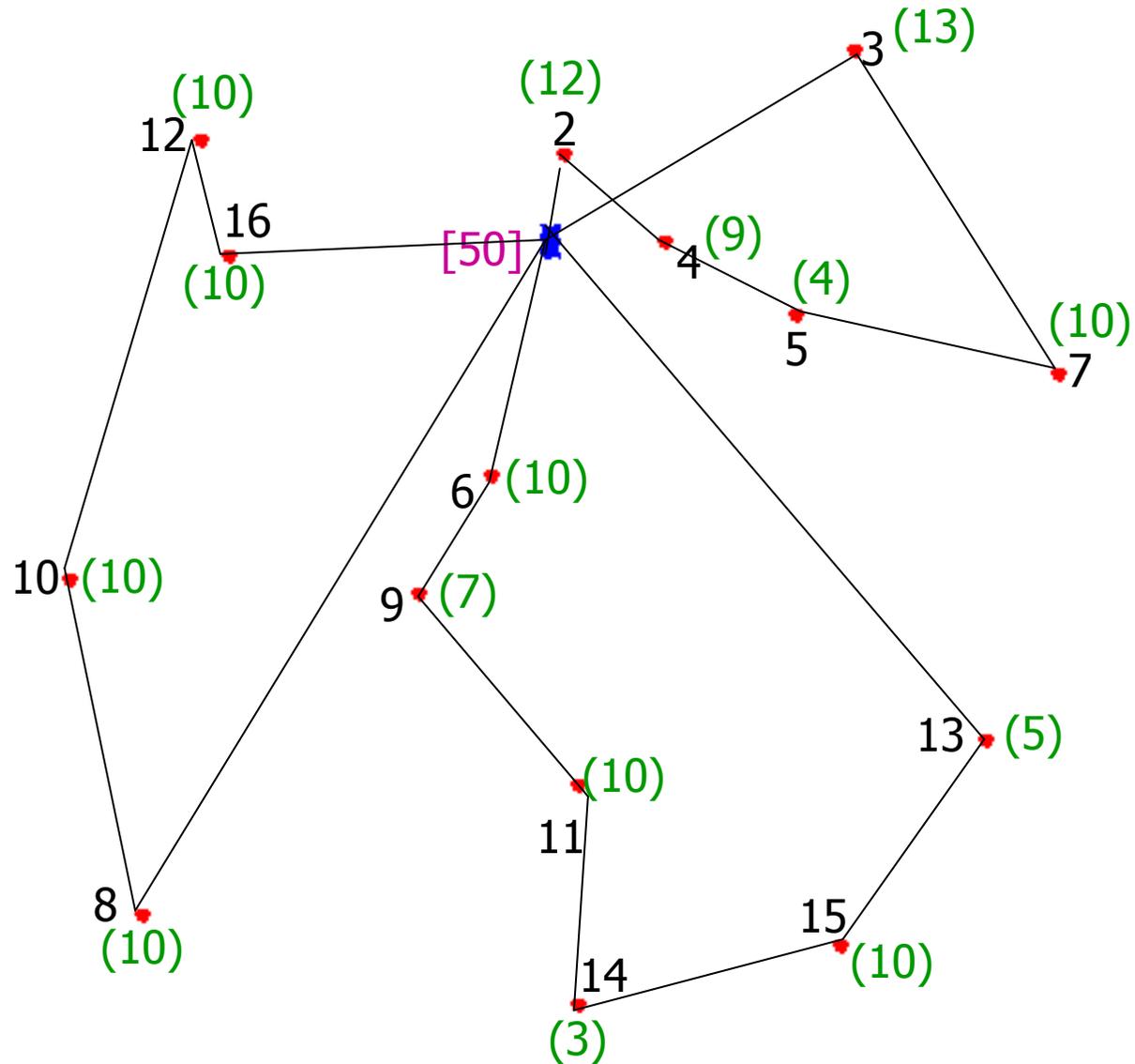
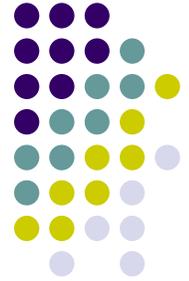
- Introdução à Otimização
 - Introdução
 - Motivação
- Heurísticas computacionais para otimização
 - Conceitos básicos
 - Heurísticas construtivas
 - Heurísticas clássicas de refinamento
 - Metaheurísticas
 - *Simulated Annealing*
 - Busca Tabu
 - GRASP
 - *Variable Neighborhood Search (VNS)*
 - *Iterated Local Search (ILS)*
 - *Guided Local Search (GLS)*
 - Algoritmos Genéticos
 - Algoritmos Meméticos
 - Colônia de Formigas (*Ant Colonies*)
 - Aplicações de técnicas heurísticas de otimização a processos produtivos:
 - Planejamento da produção
 - Corte de Estoque (*Cutting Stock*)
 - Seleção de projetos
 - Roteamento de veículos
 - Programação de horários (*timetabling*)

Otimização

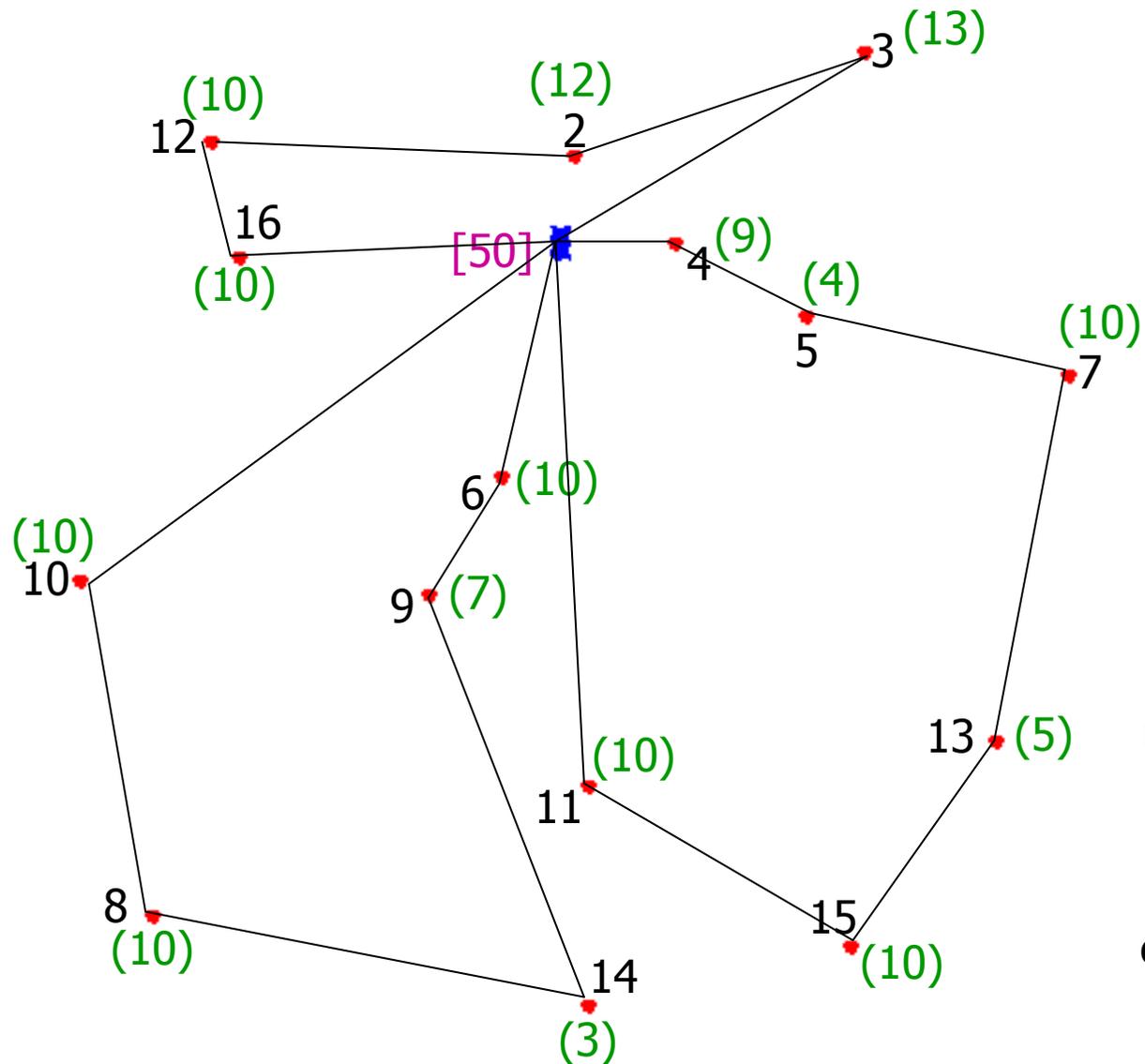


- Área da Pesquisa Operacional que utiliza o método científico para apoiar a tomada de decisões, procurando determinar como melhor projetar e operar um sistema, usualmente sob condições que requerem a alocação de recursos escassos
- Trabalha com modelos determinísticos
 - As informações relevantes são assumidas como conhecidas (sem incertezas)
- Aplicações típicas:
 - Roteirização, Programação de horários (*timetabling*)
 - Escala de motoristas, Seqüenciamento da produção

Problema de Roteamento de Veículos (*Vehicle Routing Problem*)

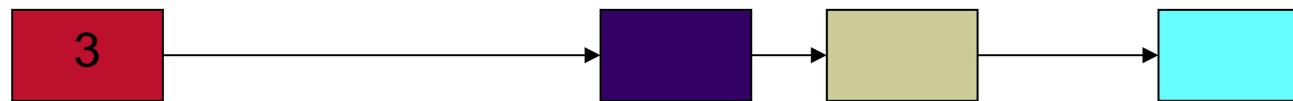
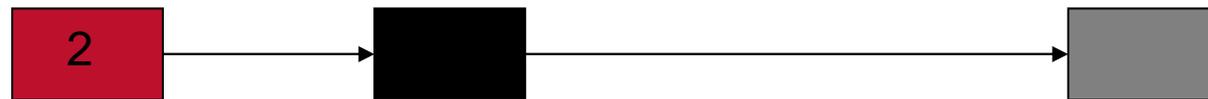
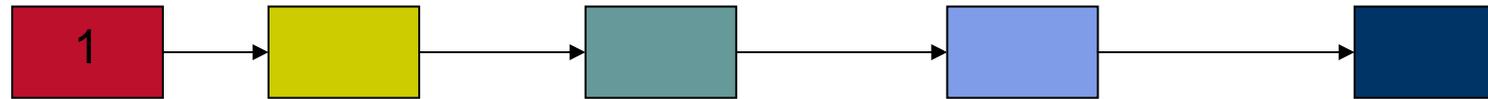


Problema de Roteamento de Veículos (*Vehicle Routing Problem*)

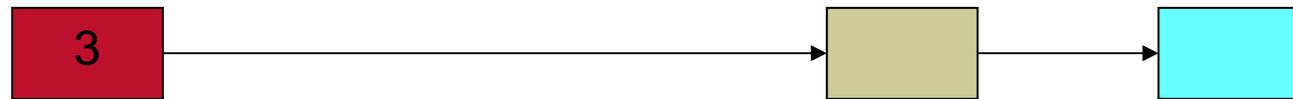
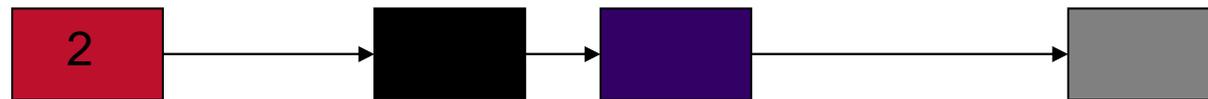
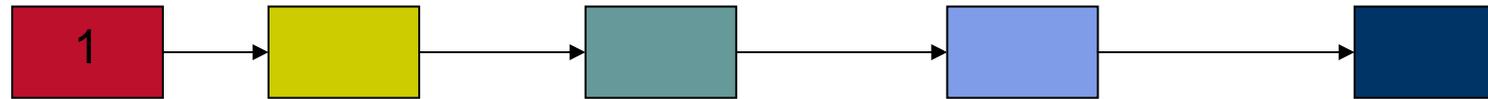


Dentre todas as possíveis roteirizações, determine aquela que minimiza a distância total percorrida

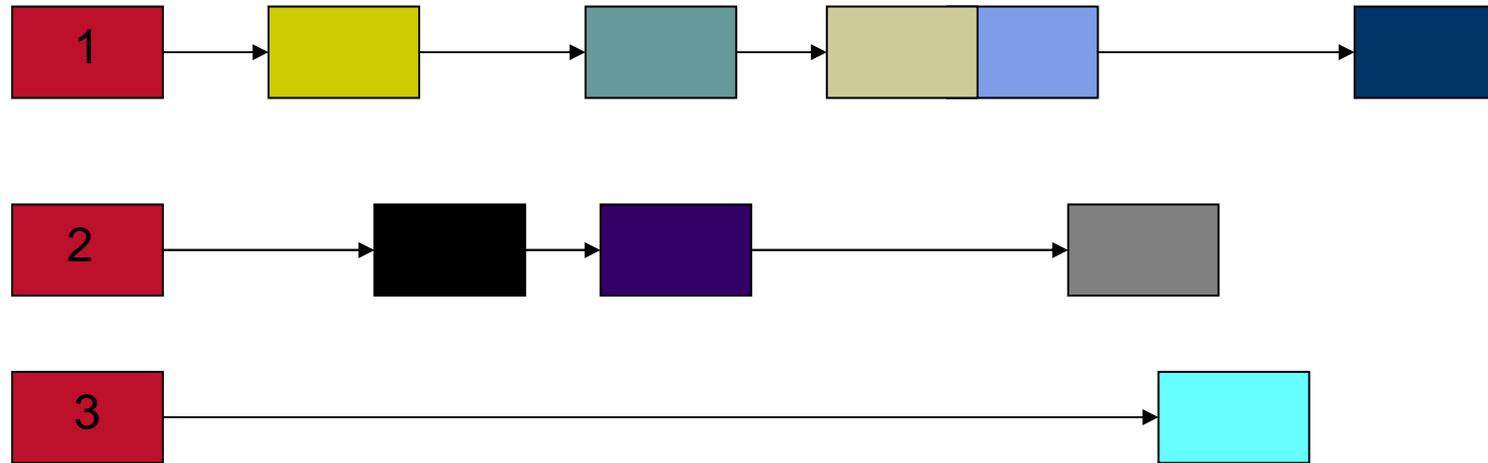
Escala de Motoristas (*Crew Scheduling*)



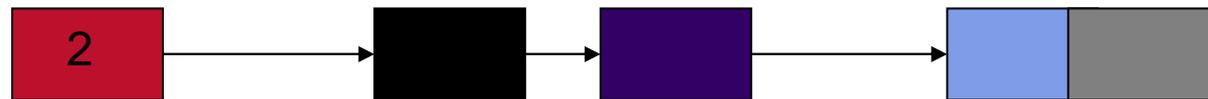
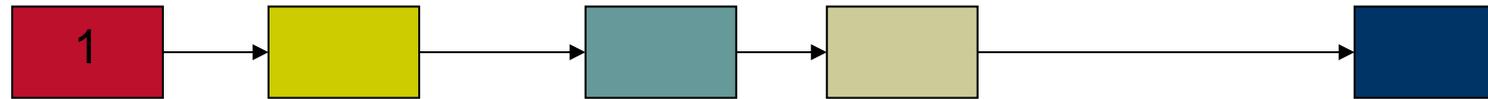
Escala de Motoristas (*Crew Scheduling*)



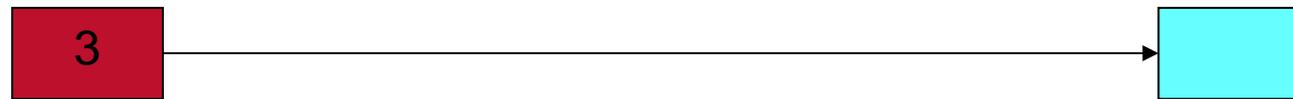
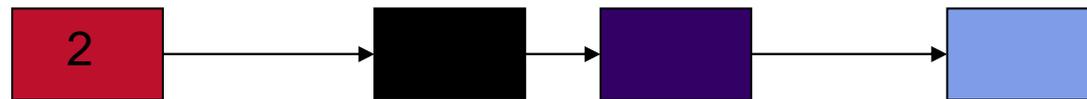
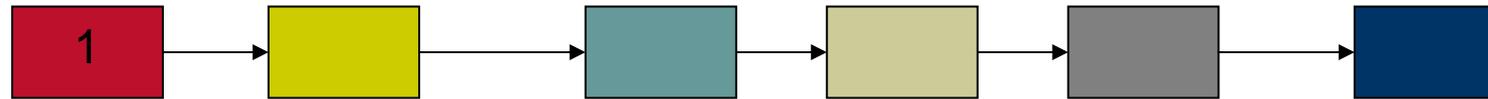
Escala de Motoristas (*Crew Scheduling*)



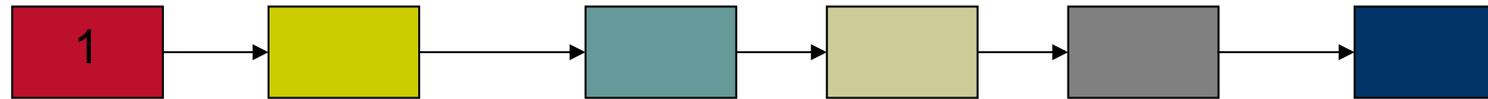
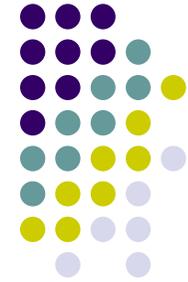
Escala de Motoristas (*Crew Scheduling*)



Escala de Motoristas (*Crew Scheduling*)



Escala de Motoristas (*Crew Scheduling*)



Redução de um tripulante!

Programação de jogos de competições esportivas (*Sports timetabling*)



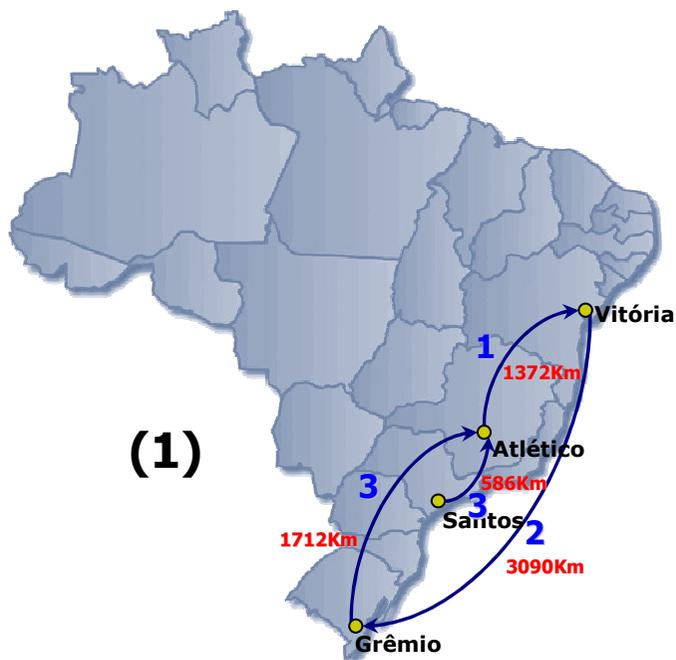
INTRODUÇÃO

- ✓ Montar uma tabela de jogos entre os times participantes de uma competição esportiva
- ✓ Satisfazer as restrições da competição
- ✓ Minimizar os custos relativos ao deslocamento dos times

Programação de jogos de competições esportivas (*Sports timetabling*)



INTRODUÇÃO



Vitória x Atlético | Grêmio x Atlético | Atlético x Santos
Distância total percorrida: 6760 Km



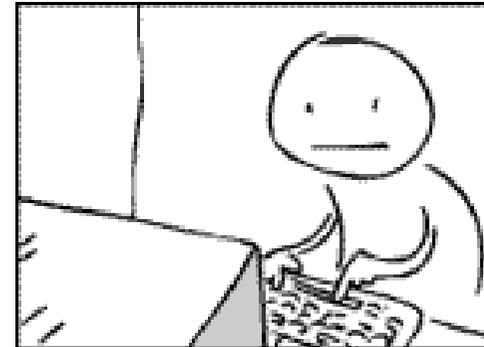
Atlético x Vitória | Grêmio x Atlético | Atlético x Santos
Distância total percorrida: 5382 Km

Economia = 1378 Km

Programação de jogos de competições esportivas (*Sports timetabling*)



JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

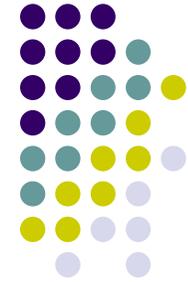


- Gastos com deslocamento
- Influência no desempenho dos times
- Enquadra-se na classe de problemas NP-difíceis
- Número de tabelas possíveis para uma competição envolvendo n times confrontando-se entre si em turnos completos (Concílio & Zuben (2002)):

$$(n-1)!(n-3)!(n-5)! \dots (n-(n-1)) \times 2^{(n-1) \times \frac{n}{2}}$$

- Competição com 20 participantes: **$2,9062 \times 10^{130}$** tabelas possíveis (aprox. 10^{114} anos para analisar todas as tabelas em um computador que analisa uma tabela em 10^{-8} segundos)

Programação de jogos de competições esportivas (*Sports timetabling*)



PROBLEMA ABORDADO

- **1ª Divisão do Campeonato Brasileiro de Futebol 2004, 2005 e 2006**
- **2ª Divisão do Campeonato Brasileiro de Futebol 2006**
- **Competições realizadas em dois turnos completos e espelhados**
- **Restrições do problema**
 1. Dois times jogam entre si duas vezes, uma no turno e a outra no retorno, alternando-se o mando de campo entre os mesmos
 2. Nas duas primeiras rodadas de cada turno, cada time alternará seus jogos, sendo um em casa e o outro na casa do adversário. Por ex.: 1ª fora, 2ª em casa
 3. As duas últimas rodadas de cada turno devem ter a configuração inversa das duas primeiras rodadas de cada turno com relação ao mando de campo. Ex.: Penúltima em casa, Última fora
 4. Não pode haver jogos entre times do mesmo estado na última rodada
 5. A diferença entre os jogos feitos em cada turno em casa e fora de casa de um time não pode ser maior que uma unidade
 6. Um time não pode jogar mais que duas vezes consecutivas dentro ou fora de casa

Programação de jogos de competições esportivas (*Sports timetabling*)



RESULTADOS COMPUTACIONAIS

➤ *Melhores soluções obtidas pelos métodos*

Instâncias	CBF		Biajoli <i>et al.</i> (2004)		ILS-MRD			
	<i>DIST</i>	<i>DIF</i>	<i>DIST</i>	<i>DIF</i>	<i>DIST</i>	<i>DIF</i>	%MDIST	%MDIF
bssp2004	905316	86610	789480	53309	754935	51199	16,61	40,89
bssp2005	838464	70655	-	-	696800	46821	16,90	33,73
bssp2006-A	658195	50769	-	-	562886	37628	14,48	25,88
bssp2006-B	998675	61454	-	-	967374	23848	3,13	61,19

- DIST: Distância total percorrida por todos os times durante o campeonato
- DIF: Distância entre o time que mais viajou e o que menos viajou
- 2004:
 - Time que menos viajou: Santos ; Campeão: Santos
- 2005:
 - Time que menos viajou: Vasco ; Campeão: Coríntians (viajou 500 Km a mais que o Vasco)

Programação de jogos de competições esportivas (*Sports timetabling*)



RESULTADOS COMPUTACIONAIS

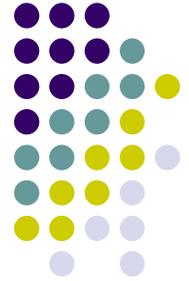
➤ *Melhores soluções obtidas pelos métodos*

Instâncias	CBF		Biajoli <i>et al.</i> (2004)		ILS-MRD			
	<i>DIST</i>	<i>DIF</i>	<i>DIST</i>	<i>DIF</i>	<i>DIST</i>	<i>DIF</i>	% <i>MDIST</i>	% <i>MDIF</i>
bssp2004	905316	86610	789480	53309	754935	51199	16,61	40,89
bssp2005	838464	70655	-	-	696800	46821	16,90	33,73
bssp2006-A	658195	50769	-	-	562886	37628	14,48	25,88
bssp2006-B	998675	61454	-	-	967374	23848	3,13	61,19

Economia possível:

- ✓ Considerando o custo do quilômetro aéreo a R\$0,70
- ✓ Delegação de 20 pessoas
- ✓ Campeonatos 2004 e 2005, Série A: Aprox. R\$ 2 milhões
- ✓ Campeonato 2006, Série A: Aprox. R\$ 1 milhão
- ✓ Campeonato 2006, Série B: Aprox. R\$ 500 mil

Controle de Pátio de Minérios



- Aplicação na mina Cauê, Itabira (MG), da CVRD
- 3 pátios de estocagem de minérios
- Minérios empilhados em balizas
- Pilhas formadas por subprodutos com composição química e granulométrica diferentes
- Objetivo é compor um lote de vagões (± 80), atendendo às metas de qualidade e produção de um dado produto
- Exemplos de algumas restrições operacionais:
 - Retomar uma pilha toda sempre que possível
 - Concentrar retomada
 - Retomar minério da esquerda para a direita e de cima para baixo

Controle de Pátio de Minérios

Pátio de Estocagem Cauê



Controle de Pátio de Minérios

Equipamentos de empilhamento e recuperação



Recuperadora (Bucket Wheel)



Recuperadora Tambor (Drum)



Empilhadeira (Stacker)

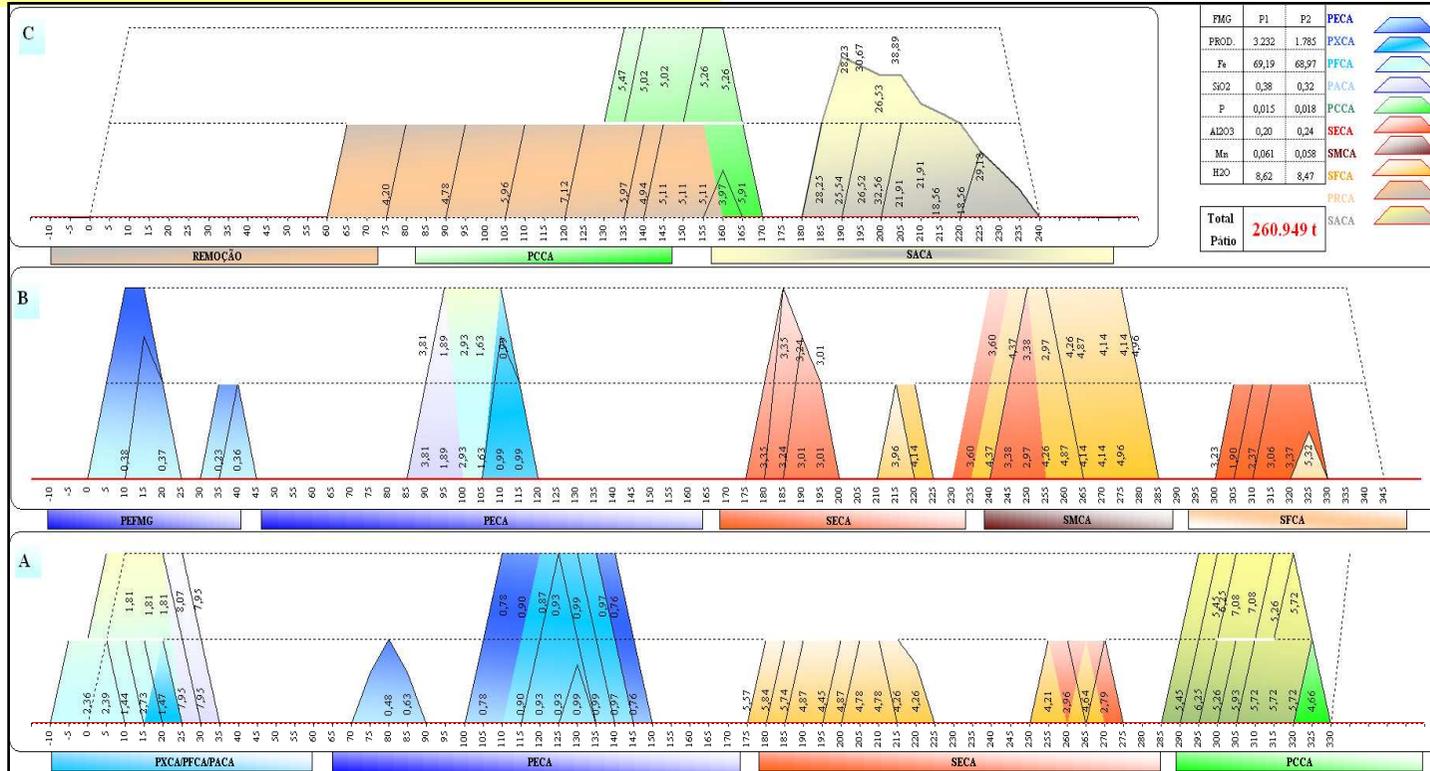
Controle de Pátio de Minérios

Silos de embarque



Controle de Pátio de Minérios

Programação/Simulação



FMG	P1	P2	PECA
PROD.	3.232	1.785	PXCA
Fe	69,19	68,97	PFCA
SO2	0,38	0,32	BACA
P	0,015	0,018	PCCA
Al2O3	0,20	0,24	SECA
Mn	0,061	0,058	SMCA
H2O	8,62	8,47	SFCA
			BRCA
			SACA
Total Pátio			260.949 t

Arquivo de: 11/07/2005 06:57

	PÁTIO A										PÁTIO B										PÁTIO C										TOTAL										Outros Estoques			
	FE	PX	PF	PA	PC	SE	SM	SF	PE	PF	PA	PC	SE	SM	SF	PE	PX	PF	PA	PC	SE	PR	SF	SA	FECA	PXCA	PFC	PACA	POCA	SECA	SMCA	SFCA	FMG	SACA	NRCA	NBCA	FSCA	FCZA						
PROD.	4.801	9.143	4.646	2.140	11.629	755	11.517	1.542	5.415	1.613	15.394	17.320	6.267	15.359	15.229	4.601	10.685	10.061	3.753	17.896	15.359	16.149	0	28.837	5.017	15.229	68.320	30.146	19.672	15.224														
Fe	69,00	68,77	67,82	64,12	64,57	66,71	65,36	68,56	67,92	67,45	67,03	65,98	65,14	64,50	46,61	69,00	68,74	67,87	65,55	64,77	64,50	67,02		65,73	69,11	46,61	68,57	68,35	67,65	66,45														
SO2	0,71	1,04	2,28	7,98	5,96	2,79	4,85	0,99	2,20	3,81	3,07	4,34	5,37	5,52	27,25	0,71	1,03	2,24	6,19	5,75	5,52	3,06		4,54	0,35	27,25	1,08	1,59	1,96	2,36														
P	0,015	0,016	0,016	0,014	0,025	0,025	0,025	0,016	0,017	0,016	0,017	0,021	0,039	0,015	0,016	0,016	0,016	0,014	0,020	0,018					0,022	0,016	0,059	0,020	0,018	0,022	0,024													
Al2O3	0,25	0,27	0,28	0,50	0,54	0,69	0,77	0,27	0,31	0,32	0,62	0,75	0,53	0,66	2,12	0,25	0,27	0,30	0,42	0,54	0,66	0,62		0,76	0,21	2,12	0,49	0,45	0,71	0,81														
Mn	0,074	0,078	0,069	0,081	0,127	0,213	0,157	0,079	0,084	0,081	0,119	0,153	0,153	0,152	0,498	0,074	0,078	0,077	0,081	0,136	0,152	0,123		0,155	0,060	0,498	0,088	0,080	0,117	0,105														
H2O	9,03	9,39	9,05	9,62	10,38	5,60	6,37	10,50	9,37	9,20	5,85	6,07	10,95	6,80	9,03	9,55	9,22	9,44	10,58	6,80	5,84		6,2	8,57	0,00	0,00	0,00	0,00	-	-														
+ 6,3mm					18,1		11,0				12,7	11,3		3,2	5,4							12,93		11,2			94,0	95,3		-														
+ 1mm					0,9	83,5	74,2				74,8	71,3		1,1	25,4					1,0	25,4	75,2	72,4			87,9				-														
0,15mm					8,5	9,0	14,5				13,4	15,4		14,1	37,0					10,4	37,0	13,2	15,0			2,6				26,0	29,9													
-0,106						8,0	12,5				11,8	13,4																			-													

Controle de Pátio de Minérios



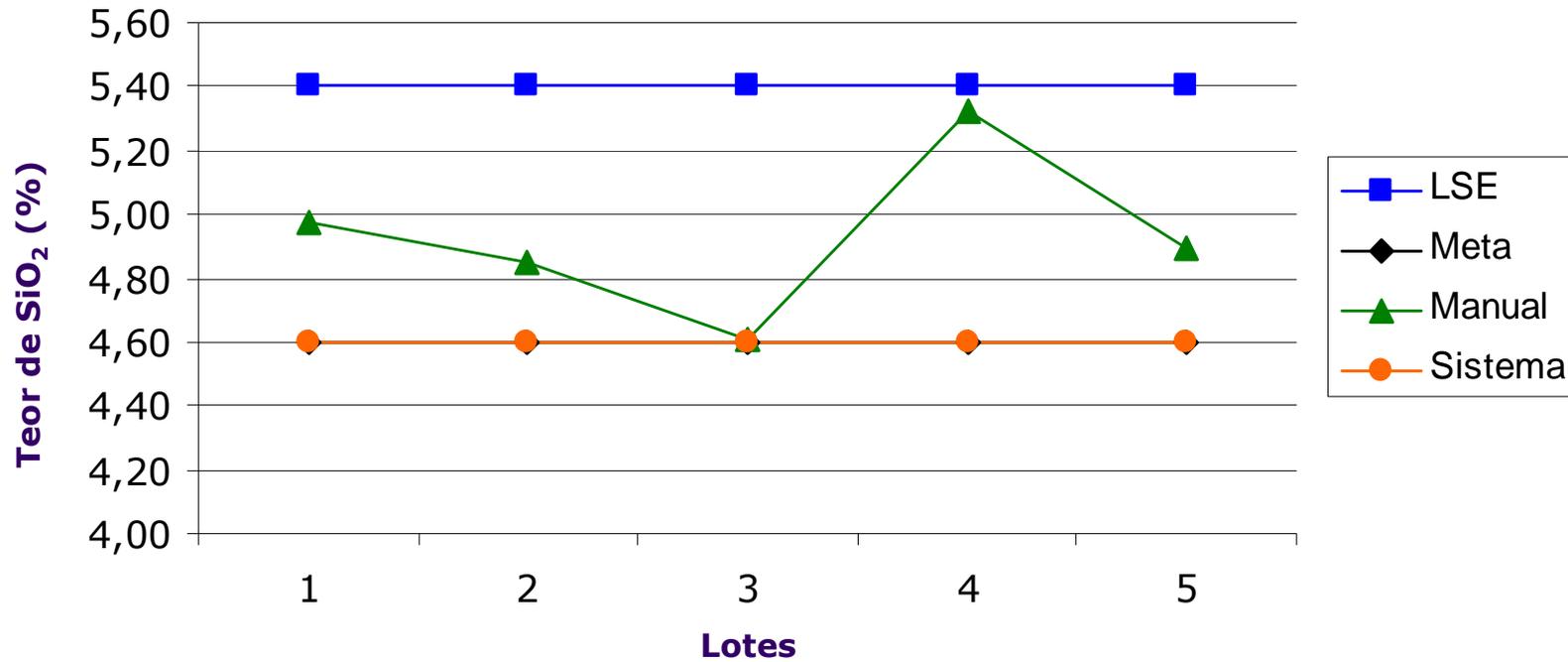
SECA	Fe	SiO ₂	P	Al ₂ O ₃	Mn	MgO	H ₂ O	+6,3	+1,0	-0,15
LSG	-	4,35	0,040	1,00	0,600	-	-	11,00	-	37,00
LSE	-	3,85	0,028	0,80	0,300	-	6,50	8,00	-	27,00
META	-	3,60	0,022	0,70	0,150	-	-	6,50	61,00	22,00
LIE	-	-	-	-	-	-	-	-	58,00	-
LIG	-	-	-	-	-	-	-	-	52,00	-
CRIT.	-	CR	CR	CR	-	-	-	-	-	CR

SFCA	Fe	SiO ₂	P	Al ₂ O ₃	Mn	MgO	H ₂ O	+6,3	+1,0	-0,15
LSG	-	5,10	0,059	1,80	-	-	7,50	-	-	44,00
LSE	-	4,50	0,043	1,40	-	-	6,50	-	-	36,00
META	-	4,20	0,035	1,20	0,170	-	6,00	-	53,00	32,00
LIE	65,00	3,70	-	-	-	-	-	-	-	-
LIG	-	2,70	-	-	-	-	-	-	-	-
CRIT.	-	CR	MI	CR	-	-	MI	-	-	CR

Controle de Pátio de Minérios



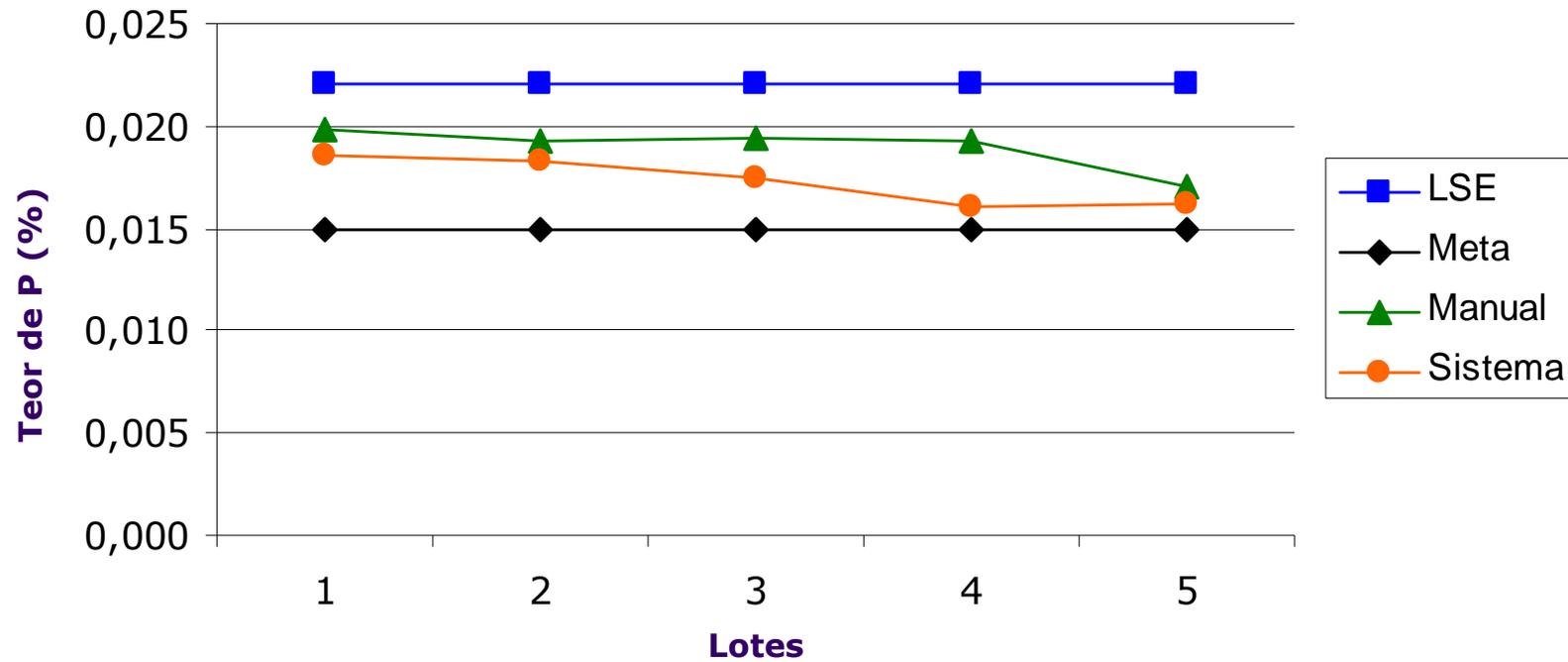
PCCA



Controle de Pátio de Minérios



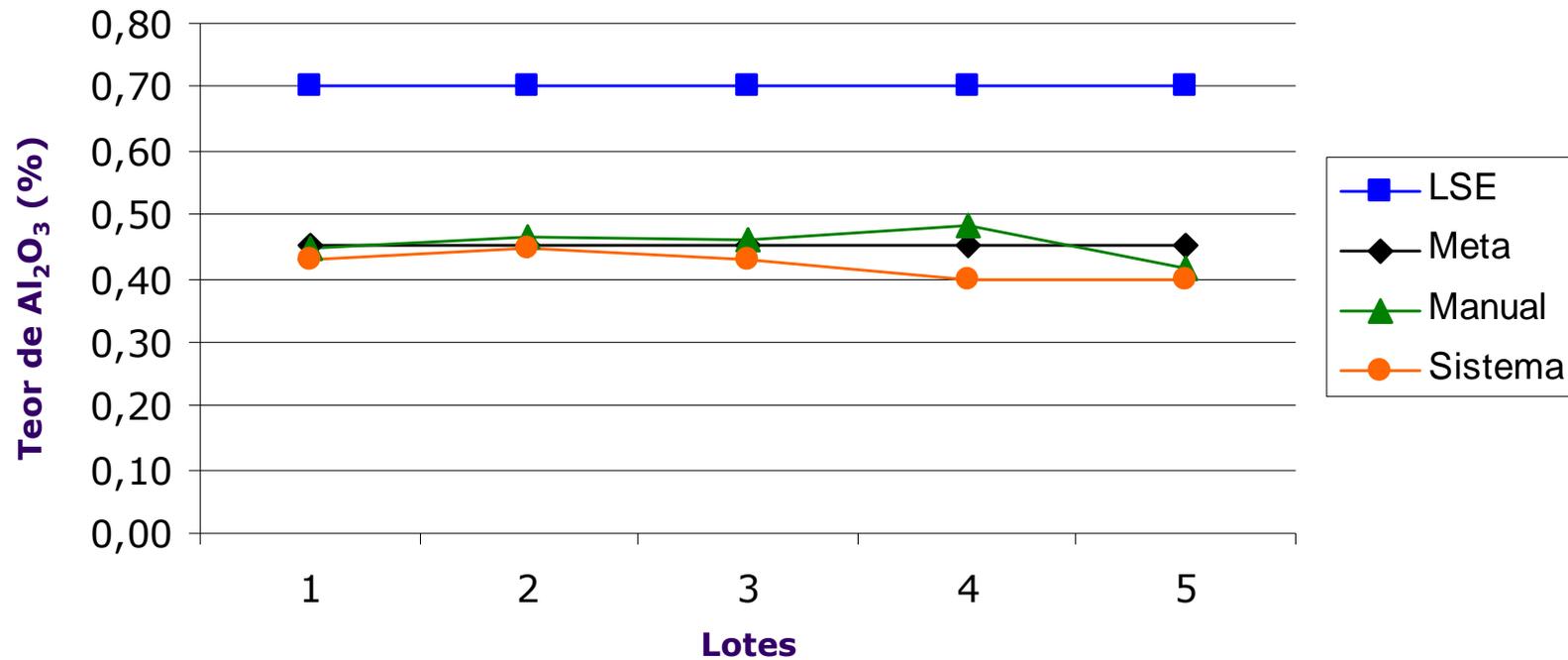
PCCA



Controle de Pátio de Minérios



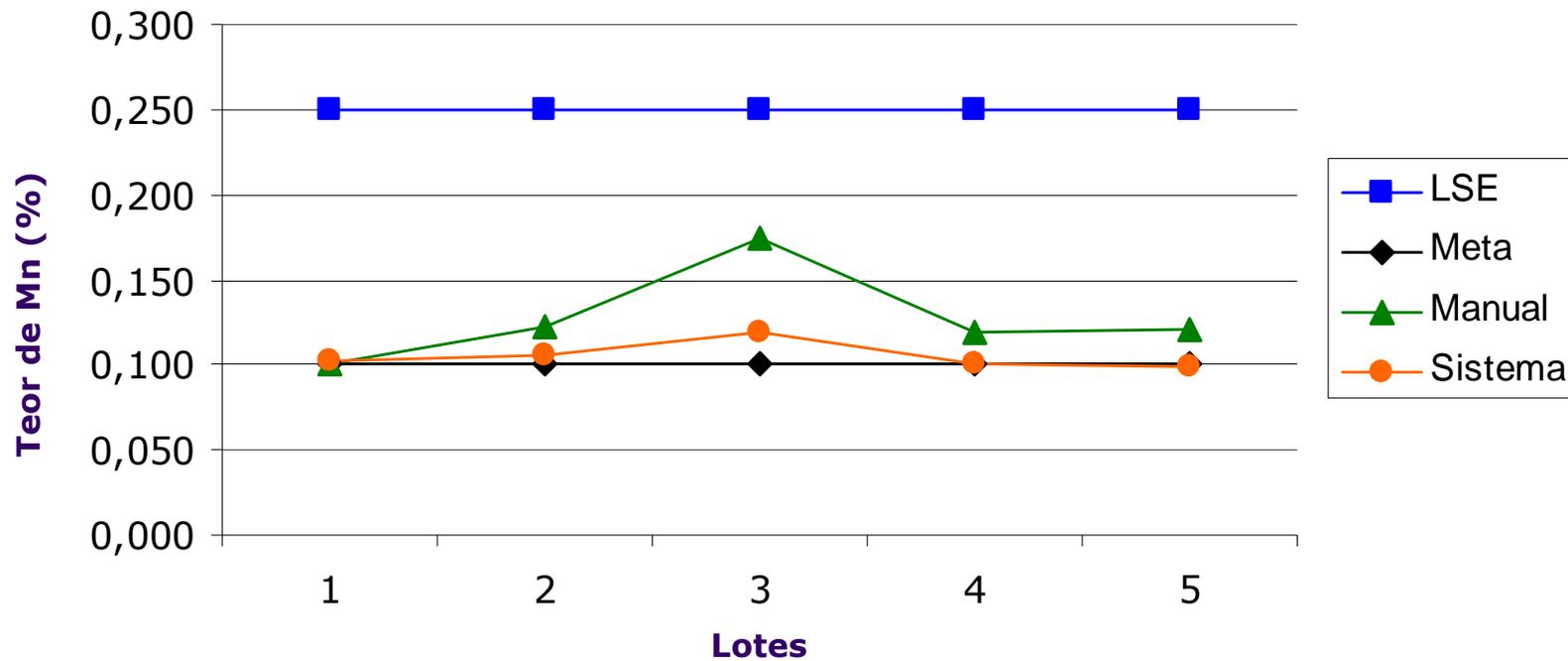
PCCA



Controle de Pátio de Minérios



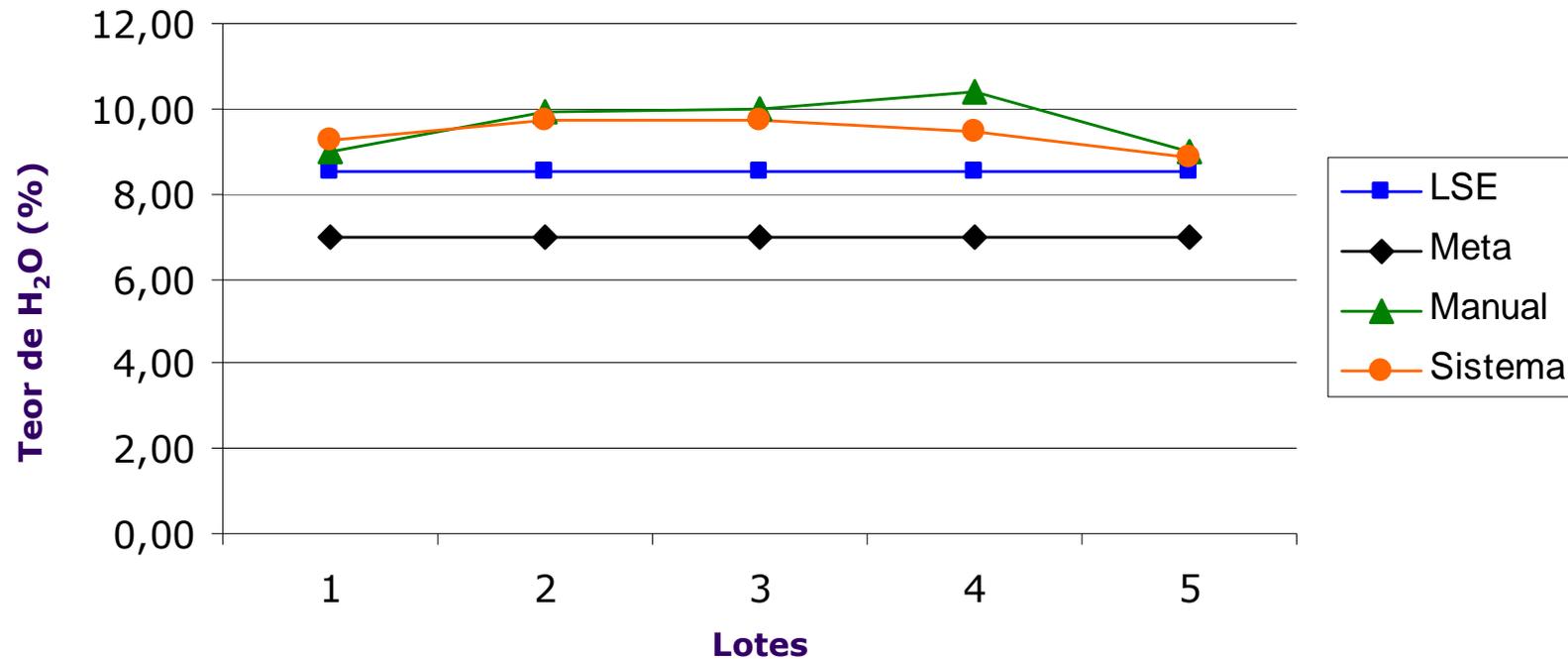
PCCA



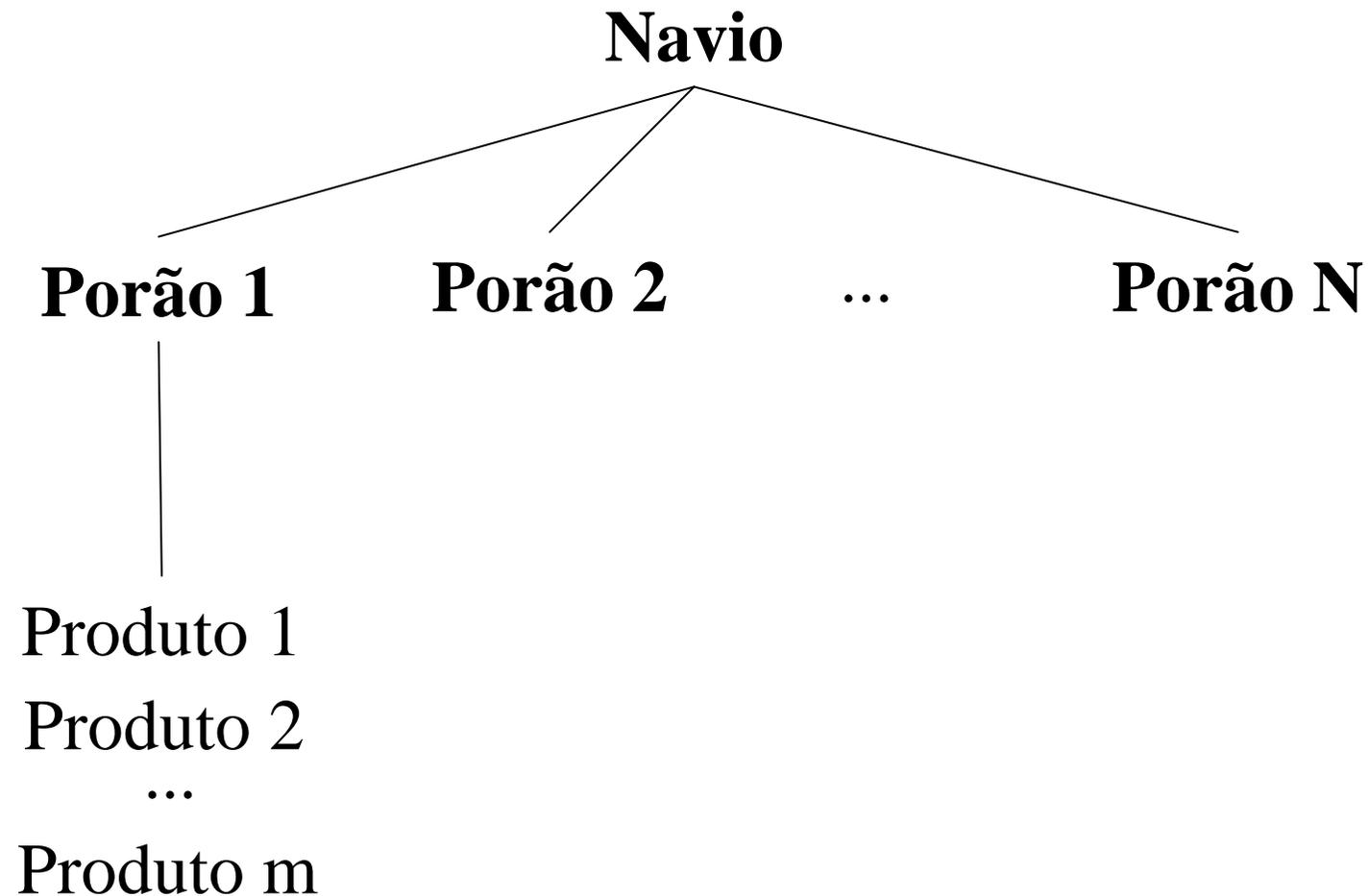
Controle de Pátio de Minérios



PCCA



Carregamento de produtos em Navios



Carregamento de produtos em Navios: Características do problema



- **Turnos de 6 horas de trabalho:**
 - 7h-13h
 - 13h-19h
 - 19h-1h
 - 1h-7h
- **8 tipos de turnos:**
 - Dia útil (horários normal e noturno)
 - Sábado (horários normal e noturno)
 - Domingo (horários normal e noturno)
 - Feriado (horários normal e noturno)
- **Terno: equipe de trabalho atuando em um porão durante um turno**

Carregamento de produtos em Navios: Características do problema



- **Existe um certo número de máquinas disponíveis para fazer o carregamento do navio: CN, CG e GB.**
- **Cada máquina possui uma produtividade diferente para cada tipo de produto.**

Carregamento de produtos em Navios: Características do problema



- **Produtos carregados em uma ordem preestabelecida.**
- **As equipes são remuneradas de acordo com a produção (ton.).**
- **Os custos variam de acordo com o produto carregado e o tipo do turno em que ocorre o turno.**
- **O custo total é dado pelo somatório dos custos com docas, encarregados, guincheiros, conferentes, estivadores e equipamento utilizado.**

Carregamento de produtos em Navios: Características do problema



- **Custo do carregamento dado pelo somatório dos custos dos ternos**
- **Carregamento concluído depois da data prevista em contrato:**
 - *Demurrage* (multa por dia de atraso)
- **Carregamento concluído antes da data prevista em contrato:**
 - Prêmio (metade da multa)
- **Objetivo é reduzir os custos com a mão-de-obra**

Diferenças entre as metodologias usadas para resolver os problemas anteriores



- Problema do controle do pátio de minérios: resolvido de forma “exata” (Encontrada a solução ótima);
- Problema da alocação de jogos: resolvido de forma “aproximada” (a solução final não é necessariamente ótima)
- Problema de carregamento de produtos em navios: também resolvido de forma “aproximada”

Exemplo: Problema da Mochila



- Imagine que os alunos da disciplina sejam contemplados com um cruzeiro marítimo após o término do curso, patrocinado pelo programa de mestrado;
- ◆ Em alto mar o navio começa a afundar ...
- ◆ Só existe um barco salva-vidas, que, no entanto, só pode levar c quilos

Exemplo: Problema da Mochila



- Cada pessoa no navio tem um certo peso p_i
- Cada pessoa i proporciona um benefício b_i se for levada para o barco salva-vidas
- O problema consiste em escolher as pessoas que trarão o maior benefício possível sem ultrapassar a capacidade do barco

Exemplo: Problema da Mochila



Pessoa	Peso (Kg)	Benefício

✓ Capacidade do barco: **250 Kg.**

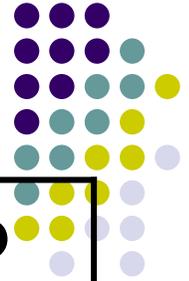
Exemplo: Problema da Mochila



Pessoa	Peso (Kg)	Benefício
cruzeirense	140	0

✓ Capacidade do barco: **250 Kg.**

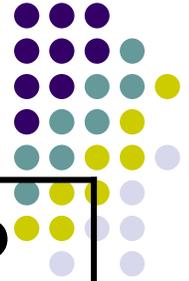
Exemplo: Problema da Mochila



Pessoa	Peso (Kg)	Benefício
cruzeirense	140	0
Recém-graduado	60	1

✓ Capacidade do barco: **250 Kg.**

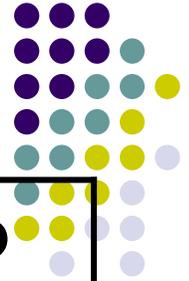
Exemplo: Problema da Mochila



Pessoa	Peso (Kg)	Benefício
cruzeirense	140	0
Recém-graduado	60	1
ATLETICANO	100	3

✓ Capacidade do barco: **250 Kg.**

Exemplo: Problema da Mochila



Pessoa	Peso (Kg)	Benefício
cruzeirense	140	0
Recém-graduado	60	1
ATLETICANO	100	3
Professor de geografia	80	4

✓ Capacidade do barco: **250 Kg.**

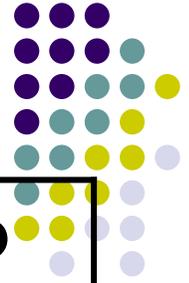
Exemplo: Problema da Mochila



Pessoa	Peso (Kg)	Benefício
cruzeirense	140	0
Recém-graduado	60	1
ATLETICANO	100	3
Professor de geografia	80	4
Morena "olhos verdes"	75	3

✓ Capacidade do barco: **250 Kg.**

Exemplo: Problema da Mochila



Pessoa	Peso (Kg)	Benefício
cruzeirense	140	0
Recém-graduado	60	1
ATLETICANO	100	3
Professor de geografia	80	4
Morena "olhos verdes"	75	3
Loira burra	60	2

✓ Capacidade do barco: **250 Kg.**

Exemplo: Problema da Mochila



Pessoa	Peso (Kg)	Benefício
cruzeirense	140	0
Recém-graduado	60	1
ATLETICANO	100	3
Professor de geografia	80	4
Morena "olhos verdes"	75	3
Loira burra	60	2
Marcone	90	10

- ✓ Capacidade do barco: **250 Kg.**
- ✓ Solução 1: $M + L + A$ (250 Kg) Benefício = 15

Exemplo: Problema da Mochila



Pessoa	Peso (Kg)	Benefício
cruzeirense	140	0
Recém-graduado	60	1
ATLETICANO	100	3
Professor de geografia	80	4
Morena “olhos verdes”	75	3
Loira burra	60	2
Marcone	90	10

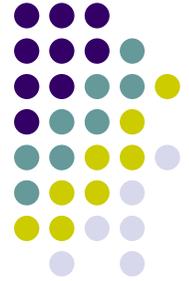
- ✓ Capacidade do barco: **250 Kg.**
- ✓ Solução 1: M + L + A (250 Kg) Benefício = 15
- ✓ Solução 2: M + MOV + PG (245 Kg) Benefício = 17

Complexidade do Problema da mochila



- Para n pessoas há 2^n configurações possíveis
- Exemplo: Para $n = 50$ há 10^{15} soluções para serem testadas
- Um computador que realiza uma avaliação em 10^{-8} segundos gastaria cerca de 130 dias para encontrar a melhor solução por enumeração completa!
- Conclusão: O barco afundaria antes que fosse tomada a decisão de quem seriam os escolhidos

Problema da Mochila: observações



- ◆ Problema NP-difícil
- ◆ Ainda não existem algoritmos que o resolva em tempo polinomial
- ◆ Abordado por métodos heurísticos

Possibilidade de resolver os problemas anteriores na otimalidade



- Problema do controle do pátio de minérios: relativamente fácil encontrar a solução ótima;
- Problema da alocação de jogos: praticamente impossível encontrar a melhor solução em um tempo razoável (quando há muitos times):
 - Em um torneio com 20 times existem $2,9062 \times 10^{130}$ tabelas possíveis (9×10^{114} anos para resolvê-lo);
 - Problema NP-difícil;
 - Tempos proibitivos para encontrar a melhor solução na maioria dos casos reais

Métodos de otimização



- ✓ **Programação matemática**
Fundamentação: na matemática
Vantagem: garantem a solução ótima (menor custo)
Desvantagens:
 - ✓ Modelagem mais complexa
 - ✓ Podem gastar um tempo proibitivo para gerar a solução ótima
 - ✓ Nem sempre conseguem produzir uma (boa) solução viável rapidamente
- ✓ **Heurísticas**
Fundamentação: na Inteligência Artificial
Vantagens:
 - ✓ De fácil implementação
 - ✓ Produzem boas soluções rapidamenteDesvantagem:
 - ✓ Não garantem a otimalidade da solução obtida