

# Um algoritmo heurístico aplicado ao problema de escalonamento de médicos do HCPA

---



Tatiana Costa Meister

Orientadora: Luciana S. Buriol



# Sumário

---

- Introdução
- Revisão da literatura
- Problema de escalonamento de médicos
- Heurística VNS proposta
- Gerador de instâncias
- Experimentos computacionais
- Conclusões



# Introdução

---

## Problemas de escalonamento

- Independente da aplicação, consiste de um grupo de pessoas e atividades a serem executadas dentro de uma janela de tempo.
- Resolução através de um escalonamento que define os responsáveis e horários de cada atividade, considerando um conjunto de restrições:
  - Restrições de factibilidade (*hard constraints*)
  - Restrições de qualidade (*soft constraints*)
- Objetivo é encontrar um escalonamento factível e de melhor qualidade.

# Introdução

Exemplo de um escalonamento simples

Sexta

**Pilates:**

6h-7h

**Trabalhar:**

8h-17h

Sábado

**Pilates:**

7h-8h

**Aula Piano:**

9h-11h

**Cinema:**

15h-18h

# Introdução

Exemplo de um escalonamento do problema de médicos

Dia 1

**João:**  
Ambulatório  
6h-12h

**Maria:**  
Cardiologia  
12h-18h

Dia 2

**João:**  
Ambulatório  
12h-18h

**Maria:**  
Cardiologia  
12h-18h



# Introdução

---

Problemas de escalonamento

- Problema prático, comum no dia-a-dia.
  - Escalonamento de médicos;
  - Escalonamento de enfermeiras;
  - Classes de um semestre da graduação;
  - Distribuição de jogos de futebol.
- Problema recorrente, devido à mudanças dentro de cada janela de escalonamento.
  - Entrada/Saída de médicos do hospital;
  - Nova área de atendimento de saúde (ex: COVID19).

# Introdução

---

Escalonamento manual aplicado ao problema de médicos

- Executado por aqueles com maior experiência e conhecimento das características do problema.
- Resulta em soluções de **baixa qualidade** devido a:
  - Grande volume de combinações das alocações entre todos os médicos;
  - Período limitado para análise das soluções;
  - Grande variedade de restrições.
- Principal foco é encontrar uma solução factível e depois adaptá-la para reduzir as violações que são mais evidentes.

# Introdução

---

Escalonamento via algoritmos aplicado  
ao problema de médicos

- Resulta em soluções de melhor qualidade devido à:
  - Exploração de mais soluções;
  - Avaliação simultânea de todas as restrições do problema.
- Desaloca os responsáveis pelo escalonamento manual para exercerem outras atividades do hospital.
- Necessário várias iterações com os responsáveis para completo entendimento e definição das restrições.



# Introdução

---

Motivação e objetivos

- Resolver o problema de escalonamento de médicos aplicado ao Hospital de Clínicas de Porto Alegre (HCPA).
- Considera versão mais atualizada e estável das restrições do HCPA.
- Comparar o impacto no desempenho entre um método exato e heurístico conforme diferentes grupos de instâncias.

# Introdução

---

Linha temporal

## **Fase 1:**

- É possível aplicar Branch & Bound?
- Dificuldade na aplicação de cortes devido à simetria entre diferentes soluções.

## **Fase 2:**

- É aconselhável o uso de heurísticas para essa versão do problema?
- Testes em diferentes tipos de heurísticas: LAHC, Busca Tabu, VNS, etc.



# Introdução

---

Desafios da implementação

- Complexidade de implementação da restrições.
  - Total de 18 restrições aplicado ao HCPA.
  - Cálculo da função objetivo necessita de estrutura de dados que facilitem o acesso às informações, sem onerar o algoritmo.
- Falta de instâncias na literatura e do HCPA.
  - Mesmo instâncias de outras versões do HCPA não puderam ser utilizadas, devido a diferenças nos dados de entrada.
- Validação das soluções geradas.

# Introdução

---

Publicação dos resultados

- Publicação dos resultados no *IEEE Congress on Evolutionary Computation 2020*.

## Solving a physician rostering problem

Tatiana C. Meister, Toni I. Wickert, Luciana S. Buriol  
*Institute of Informatics, Federal University of Rio Grande do Sul - UFRGS*  
Porto Alegre, Brazil  
tcmeister@inf.ufrgs.br, tiwickert@inf.ufrgs.br, buriol@inf.ufrgs.br

**Abstract**—Scheduling the activities for a group of physicians in a hospital is a recurring activity that impacts both the health-related costs and the quality of services provided by these professionals. Mismanagement of scheduling could lead to the use of excessive overtime to achieve health demands, increasing the costs. Moreover, physicians assigned to a stressful task over long periods may result in a reduction in their performance and

different groups considered and the implemented generator. Section IV presents the aspects concerning the VNS heuristic, like the construction of the initial solution and the details regarding the implemented neighborhoods. Section VI shows the computational results and the Section VII concludes the analyses.



# Revisão da Literatura

---

Restrições e características do  
problema na literatura

- Não existe conjunto fixo de restrições na literatura para o problema de médicos.
- Cada autor avalia e define o problema com base em características de um hospital local.
- Dificuldade em comparação dos métodos propostos, mesmo considerando os diferentes trabalhos aplicados ao HCPA.

# Revisão da Literatura

---

Métodos para resolução do problema

- Maioria dos trabalhos aplica uma formulação inteira com tempo de execução limitado com execução via solver CPLEX ou Gurobi.
- Alguns trabalhos comparam o modelo matemático com heurísticas, tais como:
  - *Adaptative Large Neighborhood Search* (ALNS)
  - *Fix and Optimize* (F&O)
  - *Late Acceptance Hill Climbing* (LAHC)
  - Busca tabu



# Revisão da Literatura

---

Heurística  
*Variable Neighborhood Search*

- Proposto por *Mladenovic* e *Hansen* em 1997.
- Consiste na aplicação de uma busca local com uso de vizinhanças.
- Amplamente utilizado na literatura para diversos problemas de otimização:
  - (BURKE et al., 2003) Escalonamento de enfermeiras;
  - (AVANTHAY; HERTZ; ZUFFEREY, 2003) Coloração grafos;
  - (KYTÖJOKI et al., 2007) Roteamento de veículos;
  - (INFÜHR; RAIDL, 2013) Mapeamento de redes virtuais.

# Revisão da Literatura

Escalonamento de médicos no HCPA

## Thor Sanchotene 2018

Trabalho de conclusão  
de curso

Versão mais antiga e  
reduzida do HCPA

Heurística *Late Acceptance  
Hill Climbing*

## Toni Wickert 2020

Tese de doutorado

Versão simplificada e  
extendida de restrições

Matheuristic  
*Fix and Optimize*

## Trabalho Atual

Dissertação de mestrado

Versão mais atual e  
estável do HCPA

Heurística *Variable  
Neighborhood Search*



# Escalonamento de Médicos

---

Definição do problema

- Definir para cada médico e dia do mês uma alocação (área e turno) ou folga.
  - Turnos: manhã, tarde e noite.
  - Janela de escalonamento mensal.
- Identificar escalonamento com menor custo associado às restrições de qualidade dentro de um tempo limite de execução.

# Escalonamento de Médicos

---

Informações de uma instância

- Contém informações que variam mês-a-mês.
  - Competência e feriados
  - Áreas do hospital
    - Demanda mínima e máxima por dia/turno
- Médicos do hospital
  - Carga horária mensal
  - Ideal de horas trabalhadas em dias não úteis
  - Áreas com permissão
  - Áreas e Dia/Turno não preferenciais
  - Alocações fixas e ausências



# Escalonamento de Médicos

---

Restrições de factibilidade  
*(hard constraints)*

- **H1** - Demanda mínima por dia/turno/área
- **H2** - Demanda máxima por dia/turno/área
- **H3** - Autorização na área
- **H4** - Ausências
- **H5** - Alocações fixas
- **H6** - Turnos em dias úteis
  - *Alocação somente em apenas um turno*
- **H7** - Turnos e áreas em dias não úteis
  - *Alocação no turno da noite ou ambos turnos da manhã/tarde*
- **H8** - Sucessão de turnos proibidos
  - *Alocação no turno da noite não pode ser seguida de manhã/tarde*

# Exemplo de um Escalonamento de Médicos

Restrições de Factibilidade

Turno	Área	Dia 1		Dia 2	
		Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Manhã	A1	2	3	2	2
Tarde	A1	1	2	1	2
Noite	A1	1	1	1	1
Manhã	A2	2	3	2	2
Tarde	A2	1	2	1	2
Noite	A2	1	1	1	1

Médico	Dia 1			Dia 2		
	Manhã	Tarde	Noite	Manhã	Tarde	Noite
M1	A1	-	-	A1	-	-
M2	A1	-	-	-	A1	-
M3	-	A2	-	A2	-	-
M4	-	-	A2	-	-	A2
M5	A2	-	-	A2	-	-
M6	A2	-	-	A1	-	-
M7	-	A1	-	A1	-	-
M8	-	-	A1	-	-	A1

Para cada dia e turno é indicado se o médico terá folga (-) ou em qual área será alocado



# Exemplo de um Escalonamento de Médicos

Restrições de Factibilidade

Atende tanto demanda mínima quanto máxima

Turno	Área	Dia 1		Dia 2	
		Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Manhã	A1	2	3	2	3
Tarde	A1	1	2	1	2
Noite	A1	1	1	1	1
Manhã	A2	2	3	2	2
Tarde	A2	1	2	1	2
Noite	A2	1	1	1	1

Médico	Dia 1			Dia 2		
	Manhã	Tarde	Noite	Manhã	Tarde	Noite
M1	A1	-	-	A1	-	-
M2	A1	-	-	-	A1	-
M3	-	A2	-	A2	-	-
M4	-	-	A2	-	-	A2
M5	A2	-	-	A2	-	-
M6	A2	-	-	A1	-	-
M7	-	A1	-	A1	-	-
M8	-	-	A1	-	-	A1

Para cada dia e turno é indicado se o médico terá folga (-) ou em qual área será alocado

# Exemplo de um Escalonamento de Médicos

Restrições de Factibilidade

Sem alocação manhã/tarde no dia seguinte da noite

Turno	Área	Dia 1		Dia 2	
		Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Manhã	A1	2	3	2	3
Tarde	A1	1	2	1	2
Noite	A1	1	1	1	1
Manhã	A2	2	3	2	2
Tarde	A2	1	2	1	2
Noite	A2	1	1	1	1

Médico	Dia 1			Dia 2		
	Manhã	Tarde	Noite	Manhã	Tarde	Noite
M1	A1	-	-	A1	-	-
M2	A1	-	-	-	A1	-
M3	-	A2	-	A2	-	-
M4	-	-	A2	-	-	A2
M5	A2	-	-	A2	-	-
M6	A2	-	-	A1	-	-
M7	-	A1	-	A1	-	-
M8	-	-	A1	-	-	A1

Para cada dia e turno é indicado se o médico terá folga (-) ou em qual área será alocado



# Exemplo de um Escalonamento de Médicos

Restrições de Factibilidade

Excede máximo permitido de médicos!

Turno	Área	Dia 1		Dia 2	
		Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Manhã	A1	2	3	2	2
Tarde	A1	1	2	1	2
Noite	A1	1	1	1	1
Manhã	A2	2	3	2	2
Tarde	A2	1	2	1	2
Noite	A2	1	1	1	1

Médico	Dia 1			Dia 2		
	Manhã	Tarde	Noite	Manhã	Tarde	Noite
M1	A1	-	-	A1	-	-
M2	A1	-	-	-	A1	-
M3	-	A2	-	A2	-	-
M4	-	-	A2	-	-	A2
M5	A2	-	-	A2	-	-
M6	A2	-	-	A1	-	-
M7	-	A1	-	A1	-	-
M8	-	-	A1	-	-	A1

Para cada dia e turno é indicado se o médico terá folga (-) ou em qual área será alocado

# Escalonamento de Médicos

---

Restrições de qualidade  
(*soft constraints*)

- **S1** - Mínimo de horas na competência
- **S2** - Máximo de horas na competência
- **S3** - Mínimo de horas em dias não úteis
- **S4** - Máximo de horas em dias não úteis
- **S5** - Equilíbrio de horas em dias não úteis
- **S6** - Final de semana incompleto
- **S7** - Máximo de finais de semana
- **S8** - Máximo de noites consecutivas
- **S9** - Áreas não preferenciais
- **S10** - Dias/turnos não preferenciais



# Exemplo de um Escalonamento de Médicos

## Restrições de Qualidade

Informação	Médico M1	Médico M2	Médico M3	Médico M4	Médico M5	Médico M6	Médico M7	Médico M8
Horas por mês	18	18	18	18	12	12	12	12

Médico	Dia 1			Dia 2		
	Manhã	Tarde	Noite	Manhã	Tarde	Noite
M1	A1	-	-	A1	-	-
M2	A1	-	-	-	A1	-
M3	-	A2	-	A2	-	-
M4	-	-	A2	-	-	A2
M5	A2	-	-	A2	-	-
M6	A2	-	-	A1	-	-
M7	-	A1	-	A1	-	-
M8	-	-	A1	-	-	A1

# Exemplo de um Escalonamento de Médicos

## Restrições de Qualidade

Informação	Médico M1	Médico M2	Médico M3	Médico M4	Médico M5	Médico M6	Médico M7	Médico M8
Horas por mês	18	18	18	18	12	12	12	12

Médico	Dia 1			Dia 2		
	Manhã	Tarde	Noite	Manhã	Tarde	Noite
M1	A1	-	-	A1	-	-
M2	A1	-	-	-	A1	-
M3	-	A2	-	A2	-	-
M4	-	-	A2	-	-	A2
M5	A2	-	-	A2	-	-
M6	A2	-	-	A1	-	-
M7	-	A1	-	A1	-	-
M8	-	-	A1	-	-	A1

Duas alocações no turno da manhã (6h) = Total 12 horas  
**6 horas abaixo do contrato**  
**Penalização da S1**



# Exemplo de um Escalonamento de Médicos

## Restrições de Qualidade

Informação	Médico M1	Médico M2	Médico M3	Médico M4	Médico M5	Médico M6	Médico M7	Médico M8
Horas por mês	18	18	18	18	12	12	12	12

Médico	Dia 1			Dia 2		
	Manhã	Tarde	Noite	Manhã	Tarde	Noite
M1	A1	-	-	A1	-	-
M2	A1	-	-	-	A1	-
M3	-	A2	-	A2	-	-
M4	-	-	A2	-	-	A2
M5	A2	-	-	A2	-	-
M6	A2	-	-	A1	-	-
M7	-	A1	-	A1	-	-
M8	-	-	A1	-	-	A1

Duas alocações no turno da noite (12h) = Total 24 horas  
**6 horas acima do contrato**  
**Penalização da S2**

# Exemplo de um Escalonamento de Médicos

## Restrições de Qualidade

Informação	Médico M1	Médico M2	Médico M3	Médico M4	Médico M5	Médico M6	Médico M7	Médico M8
Horas por mês	18	18	18	18	12	12	12	12

Médico	Dia 1			Dia 2		
	Manhã	Tarde	Noite	Manhã	Tarde	Noite
M1	A1	-	-	A1	-	-
M2	A1	-	-	-	A1	-
M3	-	A2	-	A2	-	-
M4	-	-	A2	-	-	A2
M5	A2	-	-	A2	-	-
M6	A2	-	-	A1	-	-
M7	-	A1	-	A1	-	-
M8	-	-	A1	-	-	A1

Duas alocações no turno da manhã (6h) = Total 12 horas  
**Alocações conforme contrato!**  
**Sem penalizações**

# Escalonamento de Médicos

Sistema de pesos nas restrições de qualidade

*peso S1 (mínimo horas) = 10*

*peso S2 (máximo horas) = 20*

Melhor qualidade no escalonamento **1**

## Médico 1

Contrato:  
200h

Alocações:  
194h

Penalização:  
S1 – 6h abaixo  
Custo 60

Escalonamento 1

## Médico 1

Contrato:  
200h

Alocações:  
206h

Penalização:  
S2 – 6h acima  
Custo 120

Escalonamento 2



# Escalonamento de Médicos

Sistema de pesos nas restrições de qualidade

*peso S1 (mínimo horas) = 20*

*peso S2 (máximo horas) = 10*

**Melhor qualidade no escalonamento 2**

## Médico 1

Contrato:  
200h

Alocações:  
194h

Penalização:  
S1 – 6h abaixo  
Custo 120

Escalonamento 1

## Médico 1

Contrato:  
200h

Alocações:  
206h

Penalização:  
S2 – 6h acima  
Custo 60

Escalonamento 2

# Escalonamento de Médicos

## Comparação entre versões do HCPA

**T18** – (SANCHOTENE; BURIOL, 2018)

**WB20** – modelo básico em (WICKERT et al., 2020)

**WE20** – modelo estendido em (WICKERT et al., 2020)

**Atual** – trabalho atual

Restrição	T18	WB20	WE20	Atual
Demanda mínima	H	H	H	H
Demanda máxima	H	H	H	H
Autorização na área	H	H	H	H
Ausências	H	H	H	H
Alocações fixas	-	-	-	H
Turnos em dias úteis	H	H	H	H
Turnos e áreas em dias não úteis	H	H	H	H
Sucessão de turnos proibidos	H	H	H	H
Mínimo de horas na competência	S	S	S	S
Máximo de horas na competência	S	S	S	S
Mínimo de horas em dias não úteis	-	-	H	S
Máximo de horas em dias não úteis	-	-	H	S
Equilíbrio de horas dia/noite em dias não úteis	-	-	H	S
Final de semana incompleto	S	S	S	S
Máximo de finais de semana	S	S	S	S
Máximo de noites consecutivas	S	S	S	S
Áreas não preferenciais	-	-	S	S
Dias/turnos não preferenciais	S	S	S	S
Dias consecutivos trabalhados	S	S	S	-
Máximo de horas na competência em dias úteis	-	-	S	-
Equilíbrio de horas dia/noite por semana	-	-	S	-



# Escalonamento de Médicos

## Comparação entre versões do HCPA

**T18** – (SANCHOTENE; BURIOL, 2018)

**WB20** – modelo básico em (WICKERT et al., 2020)

**WE20** – modelo estendido em (WICKERT et al., 2020)

**Atual** – trabalho atual

Restrição	T18	WB20	WE20	Atual
Demanda mínima	H	H	H	H
Demanda máxima	H	H	H	H
Autorização na área	H	H	H	H
Ausências	H	H	H	H
Alocações fixas	-	-	-	H
Turnos em dias úteis	H	H	H	H
Turnos e áreas em dias não úteis	H	H	H	H
Sucessão de turnos proibidos	H	H	H	H
Mínimo de horas na competência	S	S	S	S
Máximo de horas na competência	S	S	S	S
Mínimo de horas em dias não úteis	-	-	H	S
Máximo de horas em dias não úteis	-	-	H	S
Equilíbrio de horas dia/noite em dias não úteis	-	-	H	S
Final de semana incompleto	S	S	S	S
Máximo de finais de semana	S	S	S	S
Máximo de noites consecutivas	S	S	S	S
Áreas não preferenciais	-	-	S	S
Dias/turnos não preferenciais	S	S	S	S
Dias consecutivos trabalhados	S	S	S	-
Máximo de horas na competência em dias úteis	-	-	S	-
Equilíbrio de horas dia/noite por semana	-	-	S	-



# Escalonamento de Médicos

## Comparação entre versões do HCPA

**T18** – (SANCHOTENE; BURIOL, 2018)

**WB20** – modelo básico em (WICKERT et al., 2020)

**WE20** – modelo estendido em (WICKERT et al., 2020)

**Atual** – trabalho atual

Restrição	T18	WB20	WE20	Atual
Demanda mínima	H	H	H	H
Demanda máxima	H	H	H	H
Autorização na área	H	H	H	H
Ausências	H	H	H	H
Alocações fixas	-	-	-	H
Turnos em dias úteis	H	H	H	H
Turnos e áreas em dias não úteis	H	H	H	H
Sucessão de turnos proibidos	H	H	H	H
Mínimo de horas na competência	S	S	S	S
Máximo de horas na competência	S	S	S	S
Mínimo de horas em dias não úteis	-	-	H	S
Máximo de horas em dias não úteis	-	-	H	S
Equilíbrio de horas dia/noite em dias não úteis	-	-	H	S
Final de semana incompleto	S	S	S	S
Máximo de finais de semana	S	S	S	S
Máximo de noites consecutivas	S	S	S	S
Áreas não preferenciais	-	-	S	S
Dias/turnos não preferenciais	S	S	S	S
Dias consecutivos trabalhados	S	S	S	-
Máximo de horas na competência em dias úteis	-	-	S	-
Equilíbrio de horas dia/noite por semana	-	-	S	-

# Escalonamento de Médicos

## Comparação entre versões do HCPA

**T18** – (SANCHOTENE; BURIOL, 2018)

**WB20** – modelo básico em (WICKERT et al., 2020)

**WE20** – modelo estendido em (WICKERT et al., 2020)

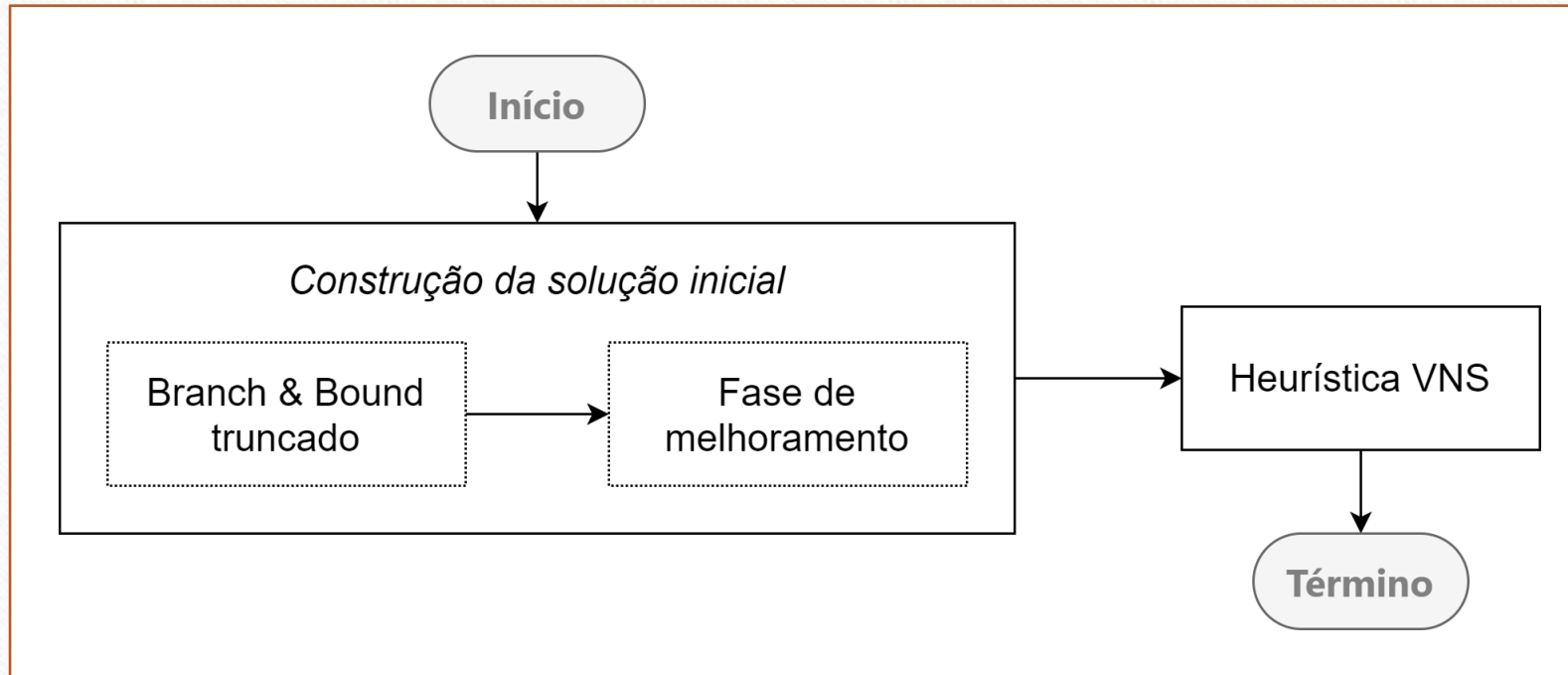
**Atual** – trabalho atual

Restrição	T18	WB20	WE20	Atual
Demanda mínima	H	H	H	H
Demanda máxima	H	H	H	H
Autorização na área	H	H	H	H
Ausências	H	H	H	H
Alocações fixas	-	-	-	H
Turnos em dias úteis	H	H	H	H
Turnos e áreas em dias não úteis	H	H	H	H
Sucessão de turnos proibidos	H	H	H	H
Mínimo de horas na competência	S	S	S	S
Máximo de horas na competência	S	S	S	S
Mínimo de horas em dias não úteis	-	-	H	S
Máximo de horas em dias não úteis	-	-	H	S
Equilíbrio de horas dia/noite em dias não úteis	-	-	H	S
Final de semana incompleto	S	S	S	S
Máximo de finais de semana	S	S	S	S
Máximo de noites consecutivas	S	S	S	S
Áreas não preferenciais	-	-	S	S
Dias/turnos não preferenciais	S	S	S	S
Dias consecutivos trabalhados	S	S	S	-
Máximo de horas na competência em dias úteis	-	-	S	-
Equilíbrio de horas dia/noite por semana	-	-	S	-



# Algoritmo Proposto

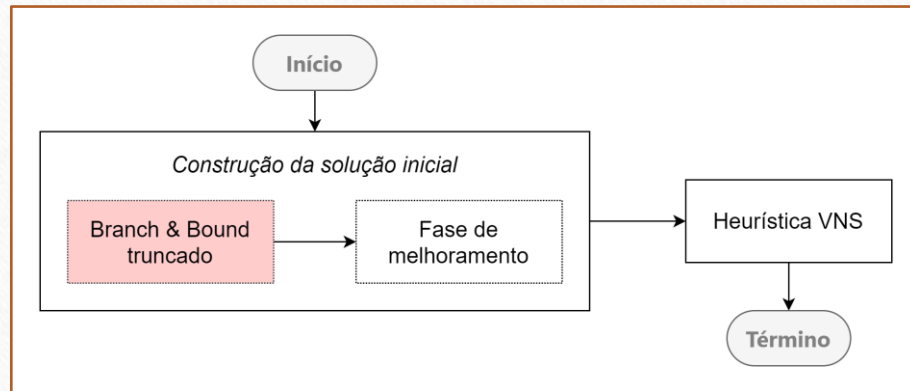
Fluxo de execução do algoritmo





# Algoritmo Proposto

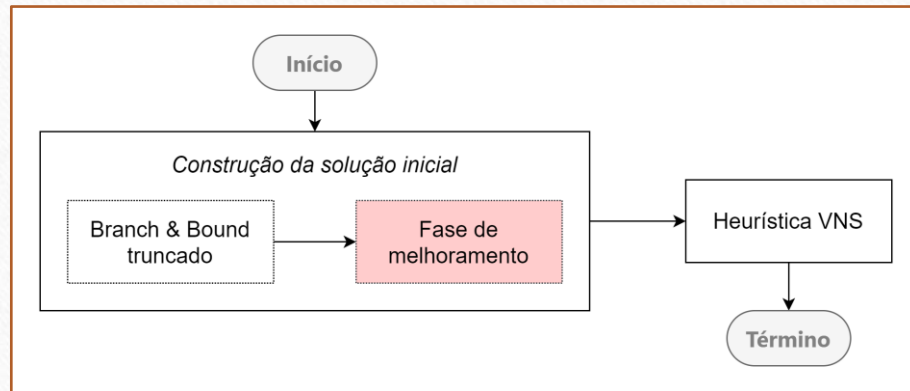
Branch & Bound truncado



- Responsável por construir uma solução inicial factível.
- É interrompido assim que a primeira solução é encontrada.
- Necessário menos de 1 segundo para encontrar uma solução factível, mesmo para instâncias grandes.
- Uso de mecanismos de ordenação para evitar percorrer soluções infactíveis e prover melhores resultados.
  - Ordem dos médicos processados e;
  - Ordem da atribuição das alocações válidas em um dia para um médico.

# Algoritmo Proposto

Fase de melhoramento

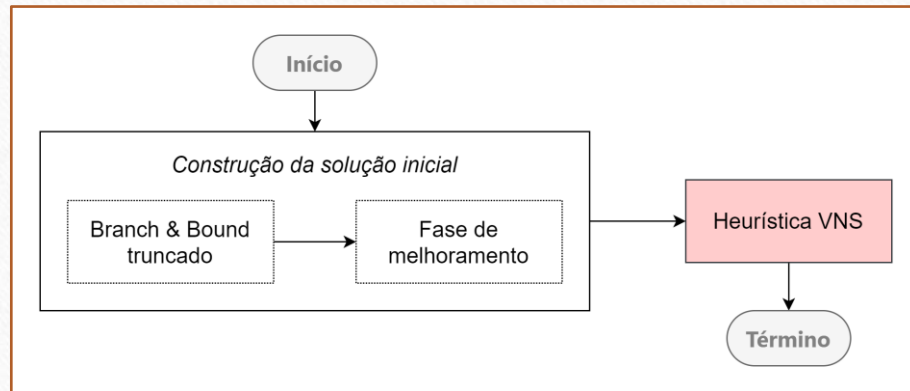


- B&B truncado apresenta altas violações das restrições de mínimo e equilíbrio de horas:
  - **S1** - Mínimo de horas na competência
  - **S3** - Mínimo de horas em dias não úteis
  - **S5** - Equilíbrio de horas em dias não úteis
- Essas restrições somente podem ser calculadas após a construção completa da solução.
- Utiliza uma busca local descendente com uso de vizinhanças que alteram uma alocação que viola alguma das restrições **S1**, **S2**, **S3**, **S4** ou **S5** por outra alocação que remove essa violação.



# Algoritmo Proposto

## Heurística VNS



- Explora uma vizinhança até que um mínimo local seja identificado, passando para a próxima vizinhança.
- Após explorar todas vizinhanças, faz uma grande modificação na solução para auxiliar na saída do mínimo local.
- Vizinhanças implementadas:
  - CHANGE
  - SWAP
  - 3-CHAIN



# Algoritmo Proposto

Vizinhança CHANGE

- Modifica a alocação de somente um médico em um dia do mês por outra alocação.
- Solução deve ser mantida factível.
- Avalia todas as trocas válidas dentre todos os médicos e todos os dias da instância.

	Dia 1 (útil)	Dia 2 (não útil)	Dia 3 (não útil)
Alocações atuais do médico <b>João</b>	Noite, Cardiologia	Folga	Manhã/Tarde, Cardiologia
Alocações atuais do médico <b>Pedro</b>	Manhã, Cardiologia	Noite, Cardiologia	Noite, Cardiologia
Alocações atuais do médico <b>José</b>	Tarde, Cardiologia	Manhã/Tarde, Cardiologia	Folga

# Algoritmo Proposto

Vizinhança CHANGE

- Modifica a alocação de somente um médico em um dia do mês por outra alocação.
- Solução deve ser mantida factível.
- Avalia todas as trocas válidas dentre todos os médicos e todos os dias da instância.

	Dia 1 (útil)	Dia 2 (não útil)	Dia 3 (não útil)
Alocações atuais do médico <b>João</b>	Noite, Cardiologia	Folga	Manhã/Tarde, Cardiologia
Alocações atuais do médico <b>Pedro</b>	Manhã, Cardiologia	Noite, Cardiologia	Noite, Cardiologia
Alocações atuais do médico <b>José</b>	Tarde, Cardiologia	Manhã/Tarde, Cardiologia	Folga

# Algoritmo Proposto

Vizinhança CHANGE

- Modifica a alocação de somente um médico em um dia do mês por outra alocação.
- Solução deve ser mantida factível.
- Avalia todas as trocas válidas dentre todos os médicos e todos os dias da instância.

	Dia 1 (útil)	Dia 2 (não útil)	Dia 3 (não útil)
Alocações atuais do médico <b>João</b>	Manhã, Cardiologia	Folga	Manhã/Tarde, Cardiologia
Alocações atuais do médico <b>Pedro</b>	Manhã, Cardiologia	Noite, Cardiologia	Noite, Cardiologia
Alocações atuais do médico <b>José</b>	Tarde, Cardiologia	Manhã/Tarde, Cardiologia	Folga



# Algoritmo Proposto

## Vizinhança SWAP

- Inverte as alocações de 2 médicos.
- Solução deve ser mantida factível.
- Avalia todas as inversões válidas dentre 50 médicos aleatórios e todos os dias da instância.

	Dia 1 (útil)	Dia 2 (não útil)	Dia 3 (não útil)
Alocações atuais do médico <b>João</b>	Noite, Cardiologia	Folga	Manhã/Tarde, Cardiologia
Alocações atuais do médico <b>Pedro</b>	Manhã, Cardiologia	Noite, Cardiologia	Noite, Cardiologia
Alocações atuais do médico <b>José</b>	Tarde, Cardiologia	Manhã/Tarde, Cardiologia	Folga

# Algoritmo Proposto

## Vizinhança SWAP

- Inverte as alocações de 2 médicos.
- Solução deve ser mantida factível.
- Avalia todas as inversões válidas dentre 50 médicos aleatórios e todos os dias da instância.

	Dia 1 (útil)	Dia 2 (não útil)	Dia 3 (não útil)
Alocações atuais do médico <b>João</b>	Noite, Cardiologia	Folga	Manhã/Tarde, Cardiologia
Alocações atuais do médico <b>Pedro</b>	Manhã, Cardiologia	Noite, Cardiologia	Noite, Cardiologia
Alocações atuais do médico <b>José</b>	Tarde, Cardiologia	Manhã/Tarde, Cardiologia	Folga

# Algoritmo Proposto

## Vizinhança SWAP

- Inverte as alocações de 2 médicos.
- Solução deve ser mantida factível.
- Avalia todas as inversões válidas dentre 50 médicos aleatórios e todos os dias da instância.

	Dia 1 (útil)	Dia 2 (não útil)	Dia 3 (não útil)
Alocações atuais do médico <b>João</b>	Manhã, Cardiologia	Folga	Manhã/Tarde, Cardiologia
Alocações atuais do médico <b>Pedro</b>	Noite, Cardiologia	Noite, Cardiologia	Noite, Cardiologia
Alocações atuais do médico <b>José</b>	Tarde, Cardiologia	Manhã/Tarde, Cardiologia	Folga



# Algoritmo Proposto

Vizinhança 3-CHAIN

- Inverte as alocações de 3 médicos.
- Solução deve ser mantida factível.
- Avalia todas as inversões válidas dentre 50 médicos aleatórios e todos os dias da instância.

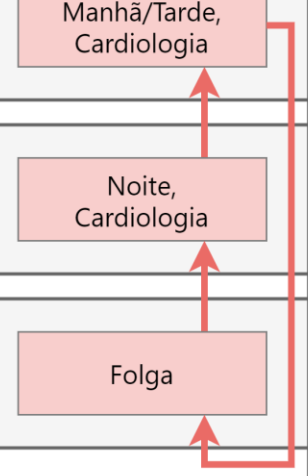
	Dia 1 (útil)	Dia 2 (não útil)	Dia 3 (não útil)
Alocações atuais do médico <b>João</b>	Noite, Cardiologia	Folga	Manhã/Tarde, Cardiologia
Alocações atuais do médico <b>Pedro</b>	Manhã, Cardiologia	Noite, Cardiologia	Noite, Cardiologia
Alocações atuais do médico <b>José</b>	Tarde, Cardiologia	Manhã/Tarde, Cardiologia	Folga

# Algoritmo Proposto

Vizinhança 3-CHAIN

- Inverte as alocações de 3 médicos.
- Solução deve ser mantida factível.
- Avalia todas as inversões válidas dentre 50 médicos aleatórios e todos os dias da instância.

	Dia 1 (útil)	Dia 2 (não útil)	Dia 3 (não útil)
Alocações atuais do médico <b>João</b>	Noite, Cardiologia	Folga	Manhã/Tarde, Cardiologia
Alocações atuais do médico <b>Pedro</b>	Manhã, Cardiologia	Noite, Cardiologia	Noite, Cardiologia
Alocações atuais do médico <b>José</b>	Tarde, Cardiologia	Manhã/Tarde, Cardiologia	Folga



# Algoritmo Proposto

Vizinhança 3-CHAIN

- Inverte as alocações de 3 médicos.
- Solução deve ser mantida factível.
- Avalia todas as inversões válidas dentre 50 médicos aleatórios e todos os dias da instância.

	Dia 1 (útil)	Dia 2 (não útil)	Dia 3 (não útil)
Alocações atuais do médico <b>João</b>	Noite, Cardiologia	Folga	Noite, Cardiologia
Alocações atuais do médico <b>Pedro</b>	Manhã, Cardiologia	Noite, Cardiologia	Folga
Alocações atuais do médico <b>José</b>	Tarde, Cardiologia	Manhã/Tarde, Cardiologia	Manhã/Tarde, Cardiologia



# Gerador de Instâncias

---

Implementação

- Parâmetros baseados em características do HCPA.
- Formato do arquivo similar à INRC-II.
- Gerador e instâncias disponíveis no Github.
- Experimentos focados no Limite Superior de Médicos Demandado por Dia/Turno/Área.
  - Máximo de médicos que um DSA pode exigir como demanda mínima.

$$limSupDSA = (noMed / (noArea * noTurno)) * \alpha$$

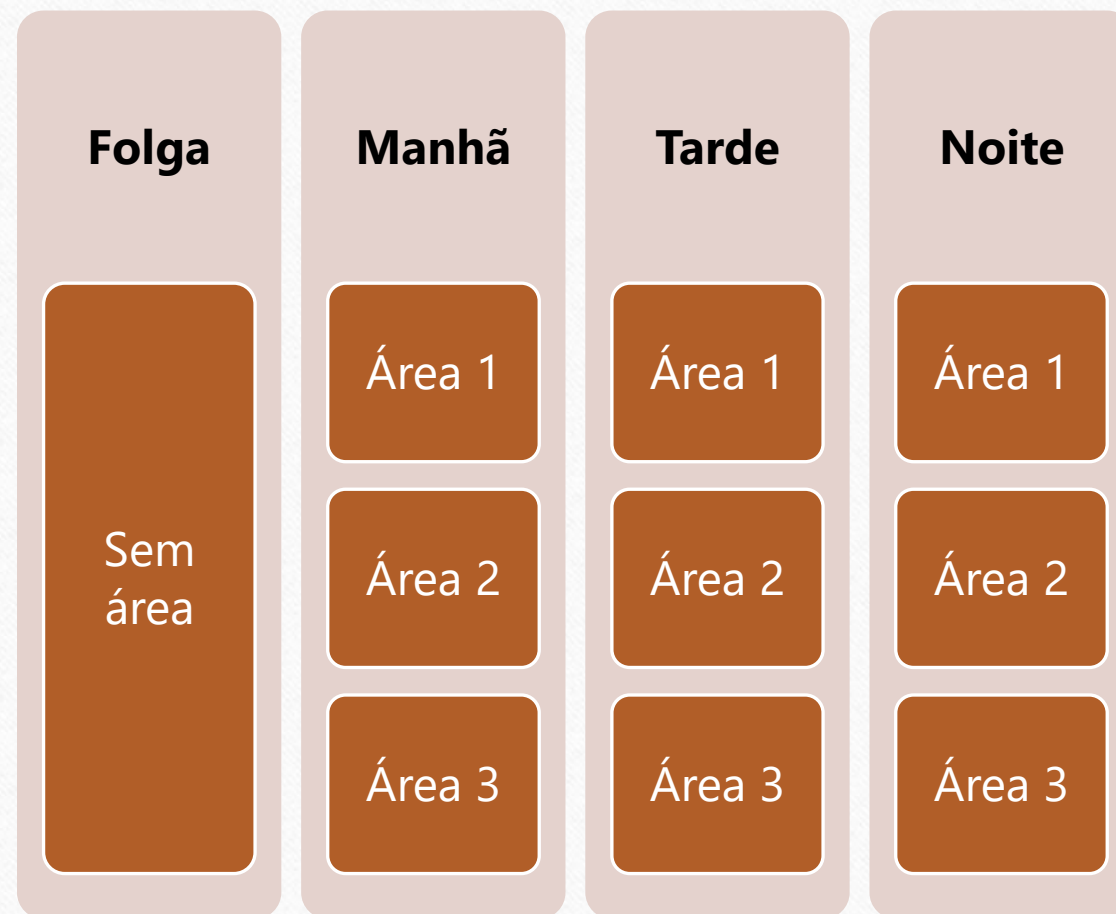
# Gerador de Instâncias

Limite superior de médicos  
demandado por dia/turno/área

*9 slots com demanda*

Mínimo DSA	Total médicos
1	9
2	18
3	27
4	36

*Slots de alocação para um dia útil*



# Gerador de Instâncias

Instâncias dos experimentos

Parâmetro	Detalhamento
Competência	Janeiro de 2020
Feriados	Feriados nacionais
Áreas	Quantidade: 4
Médicos	Quantidades: 50, 100, 150, 250, 500 80% dos médicos com contrato integral 20% dos médicos com contrato parcial
Permissão nas áreas	100% das áreas sem restrição
Áreas não preferenciais	30%
Ausências	20% para grupo de Baixa Demanda 10% para grupo de Média Demanda 0% para grupo de Alta Demanda
Alocações fixas	0%
Alocações não preferenciais	30%
Taxa de aproximação ( $\alpha$ ) do <i>limSupDSA</i>	10% para grupo de Baixa Demanda 45% para grupo de Média Demanda 90% para grupo de Alta Demanda



# Gerador de Instâncias

Instâncias dos experimentos

*3 instâncias para cada  
demanda e número de médicos*

*45 instâncias ao total*

Nome	Grupo	#Médicos	#Áreas	#Instâncias
I_BD_050P_4L_ID1 até ID3	BD	050	4	3
I_BD_100P_4L_ID1 até ID3	BD	100	4	3
I_BD_150P_4L_ID1 até ID3	BD	150	4	3
I_BD_250P_4L_ID1 até ID3	BD	250	4	3
I_BD_500P_4L_ID1 até ID3	BD	500	4	3
I_MD_050P_4L_ID1 até ID3	MD	050	4	3
I_MD_100P_4L_ID1 até ID3	MD	100	4	3
I_MD_150P_4L_ID1 até ID3	MD	150	4	3
I_MD_250P_4L_ID1 até ID3	MD	250	4	3
I_MD_500P_4L_ID1 até ID3	MD	500	4	3
I_AD_050P_4L_ID1 até ID3	AD	050	4	3
I_AD_100P_4L_ID1 até ID3	AD	100	4	3
I_AD_150P_4L_ID1 até ID3	AD	150	4	3
I_AD_250P_4L_ID1 até ID3	AD	250	4	3
I_AD_500P_4L_ID1 até ID3	AD	500	4	3

# Experimentos Computacionais

---

## Objetivos

- Avaliar desempenho do VNS para cada grupo de instâncias.
- Comparar resultados com formulação inteira executada via solver gratuito (CBC).
  - Hospital não tem verba para pagamento de uma licença do CPLEX.
- Realizar entendimento do impacto da demanda de uma instância sobre heurística VNS e solver CBC.



# Experimentos Computacionais

Ambiente e configurações

- Computador Intel Core i7, 16GB de RAM e 2,20GHz
- VNS executado 10 vezes para cada instância.
- Tempo de execução:

Método	Número de médicos da instância				
	050	100	150	250	500
VNS	60s	180s	180s	300s	300s
CBC	900s	1800s	1800s	3600s	3600s

- Avaliação da qualidade pelo GAP:  
 $(custoSolução - lowerBound) / custoSolução$



# Resultados sobre Construção da Solução Inicial

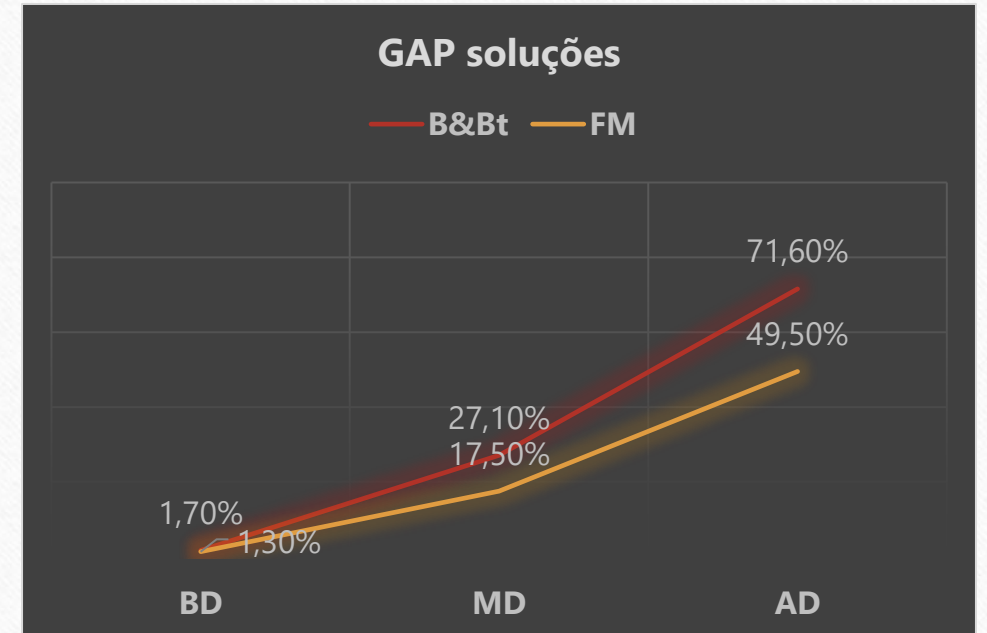
---

1. Qualidade da solução inicial em cada uma das duas fases
2. Qualidade da solução inicial com e sem mecanismos de ordenação do B&B truncado
3. Qualidade da solução inicial entre todas versões

# Resultados sobre Solução Inicial

B&B truncado x Fase de Melhoramento

Instância	LB	B&B <sup>CO</sup> <sub>t</sub>			FM sobre B&B <sup>CO</sup> <sub>t</sub>		
		Custo	GAP	Tempo	Custo	GAP	Tempo
LBD_050P_4L	222.400,00	222.400,00	0,0%	0,00s	222.400,00	0,0%	0,00s
LBD_100P_4L	372.320,00	379.927,33	2,0%	0,01s	379.927,33	2,0%	0,00s
LBD_150P_4L	594.720,00	602.032,67	1,2%	0,02s	602.032,67	1,2%	0,00s
LBD_250P_4L	894.560,00	923.695,67	3,2%	0,03s	913.940,63	2,1%	0,06s
LBD_500P_4L	1.849.600,00	1.887.993,67	2,0%	0,06s	1.874.936,83	1,4%	0,15s
média BD			1,7%			1,3%	
LMD_050P_4L	65.440,00	76.894,00	14,8%	0,01s	75.190,33	12,9%	0,00s
LMD_100P_4L	70.972,00	111.619,67	36,4%	0,02s	93.369,23	24,0%	0,02s
LMD_150P_4L	190.976,00	250.447,00	23,7%	0,02s	222.719,47	14,2%	0,06s
LMD_250P_4L	261.653,00	363.216,33	28,0%	0,04s	317.412,23	17,6%	0,15s
LMD_500P_4L	449.303,00	666.118,67	32,5%	0,09s	553.650,63	18,8%	0,71s
média MD			27,1%			17,5%	
LAD_050P_4L	38.881,33	68.547,00	43,3%	0,01s	55.459,07	29,9%	0,00s
LAD_100P_4L	6.048,67	98.249,67	93,8%	0,02s	32.108,77	81,1%	0,05s
LAD_150P_4L	39.824,33	175.547,33	77,3%	0,03s	79.345,10	49,8%	0,11s
LAD_250P_4L	79.931,33	299.681,00	73,3%	0,05s	139.716,57	42,9%	0,28s
LAD_500P_4L	185.817,00	629.538,00	70,5%	0,11s	330.511,93	43,7%	1,12s
média AD			71,6%			49,5%	

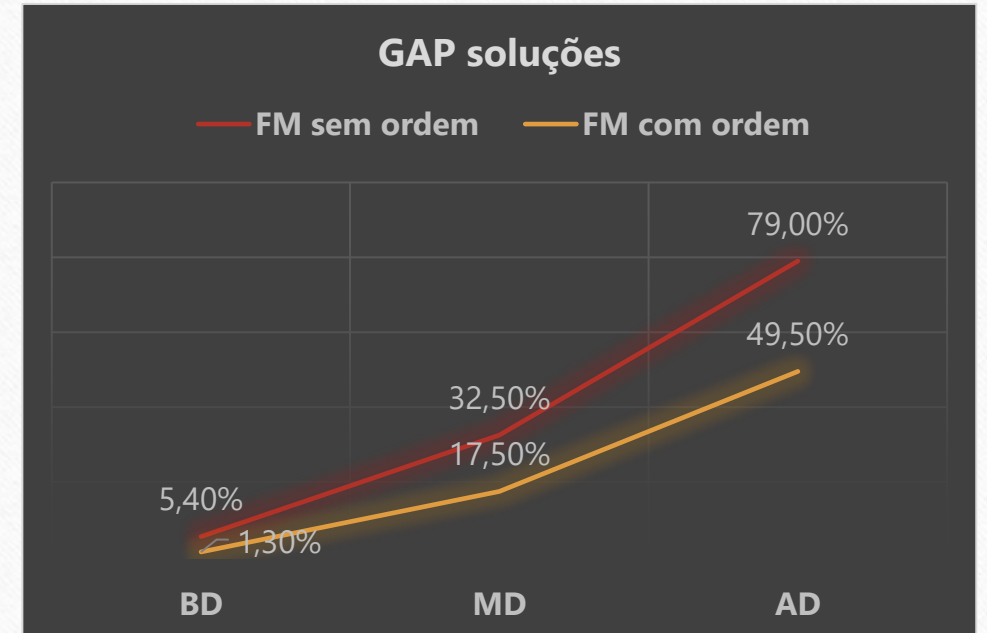




# Resultados sobre Solução Inicial

Fase de Melhoramento utilizando B&B truncado com e sem mecanismos de ordenação

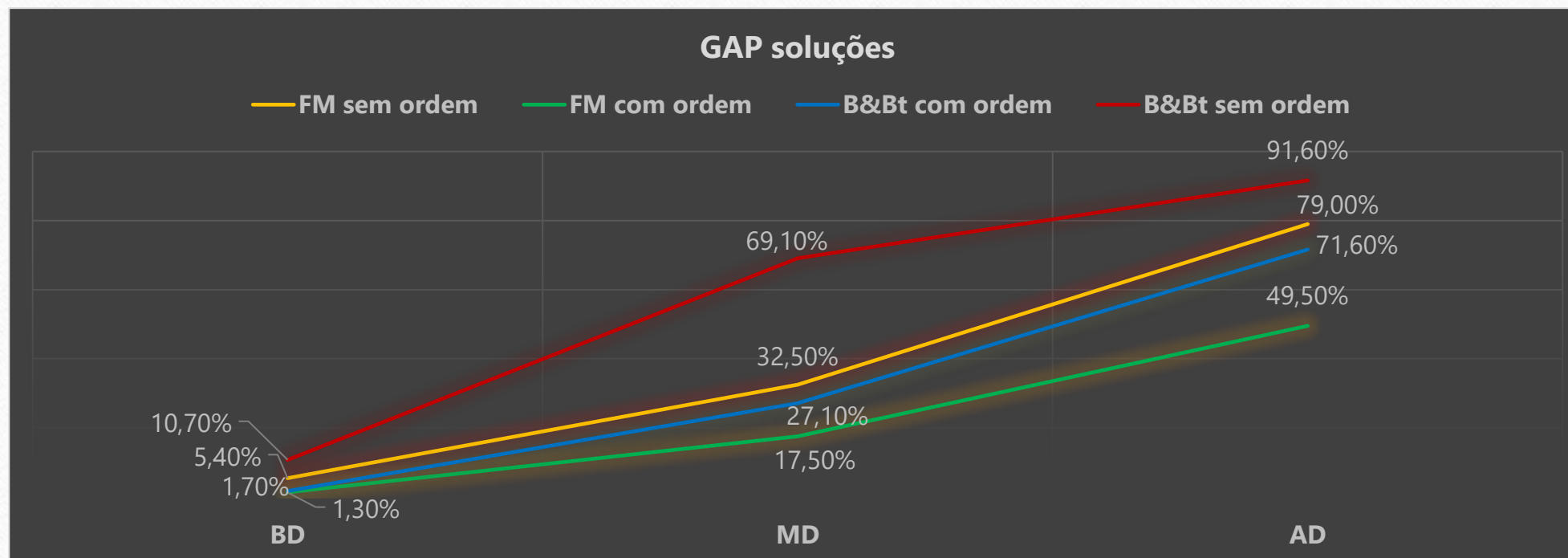
Instância	LB	FM sobre B&B <sub>t</sub> <sup>SO</sup>			FM sobre B&B <sub>t</sub> <sup>CO</sup>		
		Custo	GAP	Tempo	Custo	GAP	Tempo
LBD_050P_4L	222.400,00	222.400,00	0,0%	0,00s	222.400,00	0,0%	0,00s
LBD_100P_4L	372.320,00	431.863,67	13,8%	0,00s	379.927,33	2,0%	0,00s
LBD_150P_4L	594.720,00	661.237,00	10,1%	0,00s	602.032,67	1,2%	0,00s
LBD_250P_4L	894.560,00	911.299,93	1,8%	0,25s	913.940,63	2,1%	0,06s
LBD_500P_4L	1.849.600,00	1.877.353,70	1,5%	0,68s	1.874.936,83	1,4%	0,15s
média BD			5,4%			1,3%	
LMD_050P_4L	65.440,00	118.368,30	44,7%	0,00s	75.190,33	12,9%	0,00s
LMD_100P_4L	70.972,00	116.476,10	39,1%	0,14s	93.369,23	24,0%	0,02s
LMD_150P_4L	190.976,00	239.409,87	20,2%	0,32s	222.719,47	14,2%	0,06s
LMD_250P_4L	261.653,00	355.458,37	26,4%	0,90s	317.412,23	17,6%	0,15s
LMD_500P_4L	449.303,00	660.370,97	32,0%	3,76s	553.650,63	18,8%	0,71s
média MD			32,5%			17,5%	
LAD_050P_4L	38.881,33	99.520,53	60,9%	0,04s	55.459,07	29,9%	0,00s
LAD_100P_4L	6.048,67	143.418,83	95,8%	0,19s	32.108,77	81,1%	0,05s
LAD_150P_4L	39.824,33	233.036,40	82,9%	0,47s	79.345,10	49,8%	0,11s
LAD_250P_4L	79.931,33	389.821,63	79,5%	1,35s	139.716,57	42,9%	0,28s
LAD_500P_4L	185.817,00	768.720,60	75,8%	5,35s	330.511,93	43,7%	1,12s
média AD			79,0%			49,5%	





# Resultados sobre Solução Inicial

Todas combinações possíveis entre as duas fases



# Resultados Finais

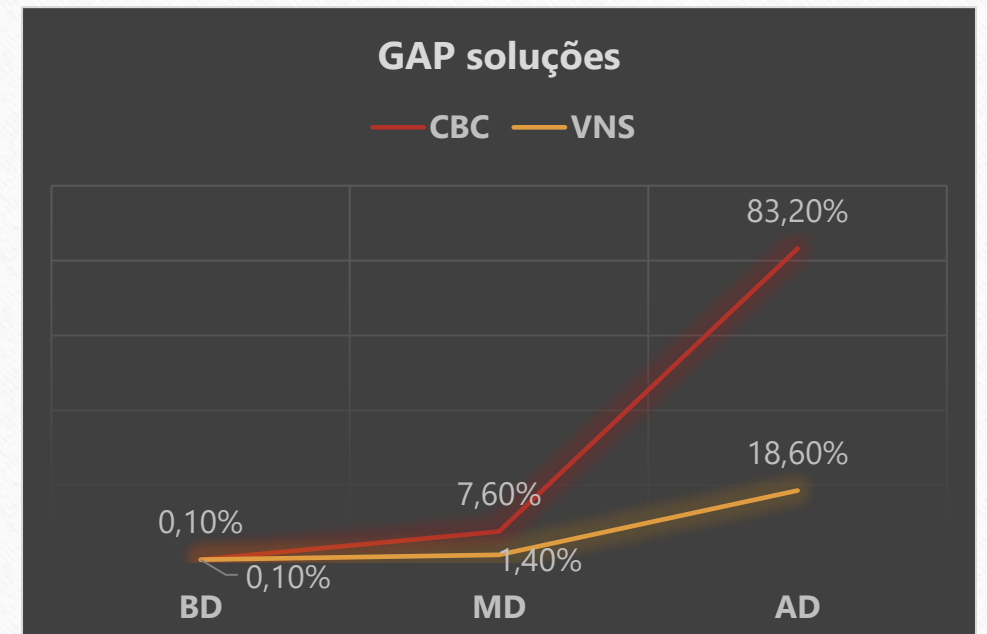
---

1. Qualidade da solução entre VNS e solver gratuito (CBC)
2. Qualidade da solução entre VNS e solver pago (CPLEX)
3. Qualidade da solução entre solução inicial, VNS, CBC e CPLEX

# Resultados Finais

VNS x solver gratuito (CBC)

Instância	LB	CBC			VNS		
		Custo	GAP	Tempo	Custo	GAP	Tempo
LBD_050P_4L	222.400,0	222.400,0	0,0%	1,3s	222.400,00	0,0%	60,01s
LBD_100P_4L	372.393,7	372.561,3	0,0%	1794,3s	372.698,43	0,1%	180,00s
LBD_150P_4L	594.720,0	594.967,3	0,0%	1797,0s	595.320,87	0,1%	180,00s
LBD_250P_4L	894.560,0	896.776,7	0,2%	3577,7s	896.595,53	0,2%	300,00s
LBD_500P_4L	1.849.600,0	1.856.826,3	0,4%	3520,0s	1.853.932,13	0,2%	300,01s
<i>média BD</i>			0,1%			0,1%	
LMD_050P_4L	65.680,0	65.687,7	0,0%	898,0s	66.017,57	0,5%	60,01s
LMD_100P_4L	70.972,0	79.337,7	10,5%	1780,7s	72.063,57	1,5%	180,01s
LMD_150P_4L	190.976,0	199.691,7	4,4%	1782,7s	192.814,20	1,0%	180,01s
LMD_250P_4L	261.653,0	275.986,3	5,2%	3551,0s	265.407,23	1,4%	300,00s
LMD_500P_4L	449.303,0	547.754,3	17,8%	3388,0s	460.169,43	2,4%	300,01s
<i>média MD</i>			7,6%			1,4%	
LAD_050P_4L	39.750,7	NE	100,0%	900,0s	41.903,10	5,1%	60,02s
LAD_100P_4L	6.048,7	39.689,3	84,7%	1767,3s	13.578,43	55,4%	180,01s
LAD_150P_4L	39.824,3	79.057,3	49,6%	1655,7s	46.995,13	15,3%	180,01s
LAD_250P_4L	79.931,3	133.031,0	81,6%	3534,7s	84.110,37	5,0%	300,01s
LAD_500P_4L	185.873,0	NE	100,0%	3600,0s	211.470,67	12,1%	300,01s
<i>média AD</i>			83,2%			18,6%	

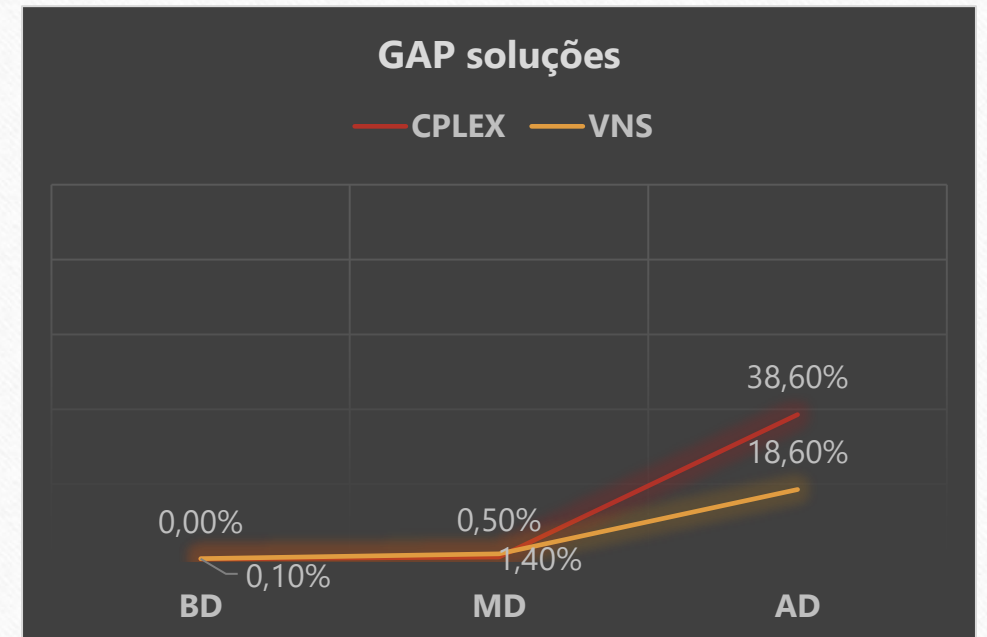




# Resultados Finais

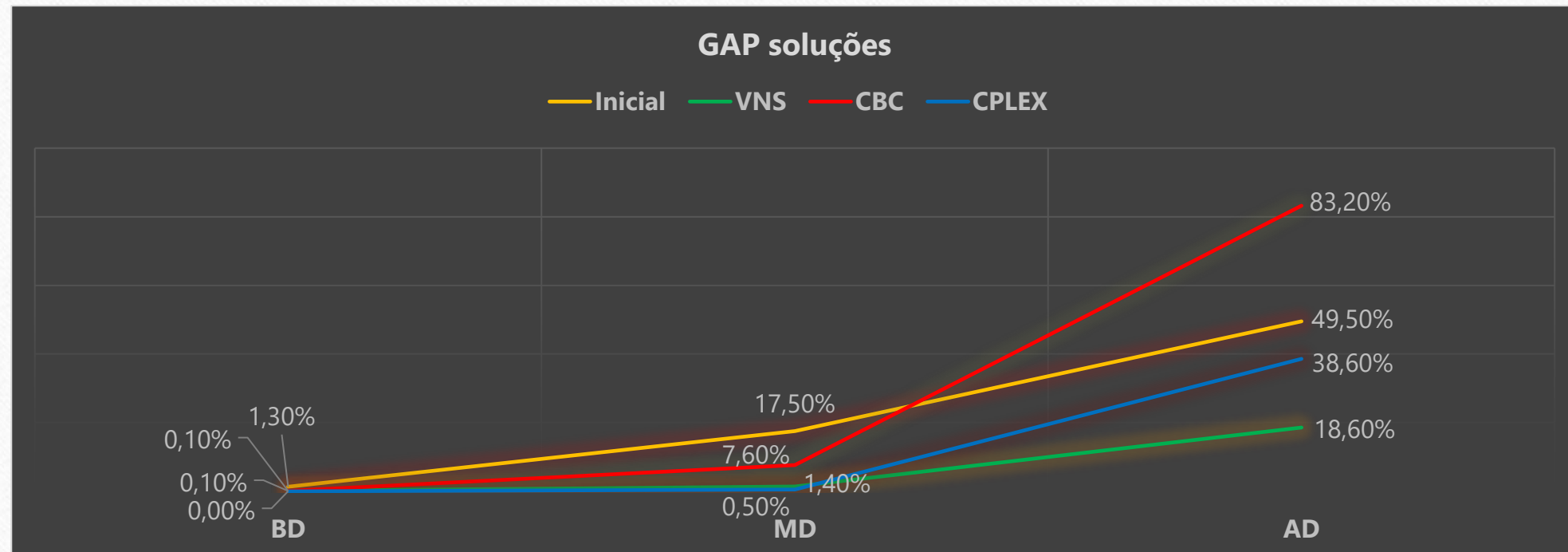
VNS x solver pago (CPLEX)

Instância	LB	CPLEX			VNS		
		Custo	GAP	Tempo	Custo	GAP	Tempo
LBD_050P_4L	222.400,0	222.400,0	0,0%	1,00s	222.400,00	0,0%	60,01s
LBD_100P_4L	372.393,7	372.563,3	0,0%	1844,00s	372.698,43	0,1%	180,00s
LBD_150P_4L	594.720,0	594.964,7	0,0%	1857,33s	595.320,87	0,1%	180,00s
LBD_250P_4L	894.560,0	895.280,3	0,1%	3644,67s	896.595,53	0,2%	300,00s
LBD_500P_4L	1.849.600,0	1.850.560,0	0,1%	3627,33s	1.853.932,13	0,2%	300,01s
média BD			0,0%			0,1%	
LMD_050P_4L	65.680,0	65.681,3	0,0%	373,67s	66.017,57	0,5%	60,01s
LMD_100P_4L	70.972,0	71.363,0	0,5%	1805,67s	72.063,57	1,5%	180,01s
LMD_150P_4L	190.976,0	191.531,0	0,3%	1802,00s	192.814,20	1,0%	180,01s
LMD_250P_4L	261.653,0	262.895,0	0,5%	3604,67s	265.407,23	1,4%	300,00s
LMD_500P_4L	449.303,0	455.595,7	1,4%	3609,67s	460.169,43	2,4%	300,01s
média MD			0,5%			1,4%	
LAD_050P_4L	39.750,7	47.140,0	12,8%	900,00s	41.903,10	5,1%	60,02s
LAD_100P_4L	6.048,7	6.197,7	2,4%	1800,00s	13.578,43	55,4%	180,01s
LAD_150P_4L	39.824,3	164.788,3	74,4%	1800,00s	46.995,13	15,3%	180,01s
LAD_250P_4L	79.931,3	203.836,7	51,3%	3602,67s	84.110,37	5,0%	300,01s
LAD_500P_4L	185.873,0	412.477,0	52,3%	3604,67s	211.470,67	12,1%	300,01s
média AD			38,6%			18,6%	



# Resultados Finais

Comparação entre solução inicial, VNS, CBC e CPLEX



# Experimentos Computacionais

---

## Conclusões

- Instâncias de **baixa e média demanda** não apresentam diferenças significativas na qualidade entre CBC e VNS.
  - A escolha entre o solver ou o VNS proposto deve observar o tempo disponível para execução.
- Instâncias de **alta demanda** apresentam melhores resultados no VNS proposto.
  - Os resultados são, inclusive, melhores do que os fornecidos por um solver com licença (CPLEX).



# Conclusões

---

- Estudo sobre variante das restrições do HCPA mais atual e estável.
- Implementação e distribuição de um gerador de instâncias baseado nas características do HCPA.
- Estudo do algoritmo de Branch & Bound aplicado ao problema.
- Desenvolvimento de uma heurística *Variable Neighborhood Search* (VNS).
- Avaliação do uso do VNS e de um solver gratuito conforme demanda da instância.

# Um algoritmo heurístico aplicado ao problema de escalonamento de médicos do HCPA

---



Tatiana Costa Meister

[meistertatiana@gmail.com](mailto:meistertatiana@gmail.com)

Orientadora: Luciana Buriol

