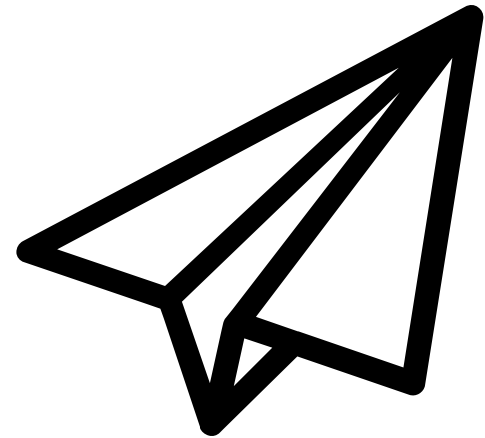


ESTUDO DO PROBLEMA DE RECUPERAÇÃO DA MALHA DE EMPRESA AÉREA



Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo

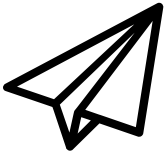
Mestrado em Engenharia de Transportes

Fábio Emanuel de Souza Moraes

Orientador: Prof. Dr. Nicolau D. Fares Gualda

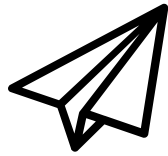
Co-Orientador: Daniel Jorge Caetano

1/março/2018



- **PROBLEMA DE RECUPERAÇÃO DA MALHA**
- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA
- CARACTERIZAÇÃO/MODELAGEM DE DADOS
- METODOLOGIAS
- RESULTADOS
- CONCLUSÕES/PRÓXIMOS PASSOS

PROBLEMA DE RECUPERAÇÃO DA MALHA



Perturbações

- Atrasos
- Cancelamentos

2016

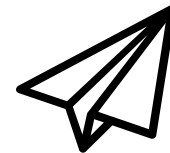
- US\$ 60 bilhões
- 8% Receita / 9% Custo

Longo Prazo

- Aumenta a propensão do PAX para trocar de empresa (COOK *et al.* 2009)



Departures							
				Time Now 08:39:07			
Time	Destination	Plat	Expt	Time	Destination	Plat	Expt
08:39	Chessington Sth		Cancelled	09:15	via Guildford		Cancelled
08:42	Basingstoke		Cancelled	09:15	Reading		Cancelled
08:42	Strawberry Hill		Cancelled	09:18	Teddington		Cancelled
08:45	Portsmouth Hbr via		Cancelled	09:20	Salisbury		Cancelled
08:45	Reading		Cancelled	09:20	Woking		Cancelled
08:48	Teddington		Cancelled	09:24	Dorking		Cancelled
08:50	Woking		Cancelled	09:27	Strawberry Hill		Cancelled
08:53	Alton		Cancelled	09:28	Windsor & Eton		Cancelled
08:54	Dorking		Cancelled	09:33	Teddington		Cancelled
08:57	Strawberry Hill		Cancelled	09:35	Bournemouth		Cancelled
08:58	Windsor & Eton		Cancelled	09:36	via Cobham		Cancelled
09:03	Teddington		Cancelled				
09:05	Bournemouth		Cancelled				
09:06	Guildford via		Cancelled				
09:09	Chessington Sth		Cancelled				
09:12	Basingstoke		Cancelled				
09:12	Strawberry Hill		Cancelled				



Resolver o PROBLEMA DE RECUPERAÇÃO DA MALHA

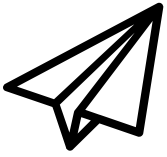
Definição → Encontrar uma nova Programação de Voos que atenda às perturbações e que a operação volte a normalidade depois de um Período de Recuperação;

Objetivo da Otimização → Minimizar as alterações na malha

Instâncias → Pequenas, Médias e Grandes;

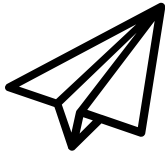
Perturbações → Atraso de Voo, Cancelamento de Voo, Manutenção Não-Programada e Redução de Capacidade Aeroportuária;

Tempo de Processamento → Até 20 min



- PROBLEMA DE RECUPERAÇÃO DA MALHA
- **REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**
- CARACTERIZAÇÃO/MODELAGEM DE DADOS
- METODOLOGIA
- RESULTADOS
- CONCLUSÕES/PRÓXIMOS PASSOS

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA - REFERÊNCIAS

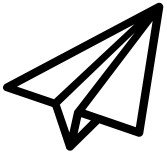


Thengvall(2001)

- Aircraft Recovery Problem (ARP)
- Fluxo de Rede Multi-Commodity por Tipo de Aeronave;
- Divide o Problema da programação de malha em dois: Atribuição de Frota e Rotação de Aeronaves;
- Fechamento de Hub
- Atrasos, Cancelamento, Traslados e Trocas de aeronave em nível de frota
- Instância Grandes
- Não Prevê Manutenção

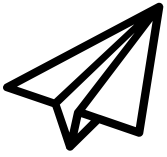
Zhang et al(2016)

- Aircraft + Passenger
- O ARP segue a proposta de Thengvall(2001)
- Redução de capacidade aeroportuária
- Manutenção Programada e Não-Programada
- Problemas na Rotação:
 - Alocação Aleatória
 - Arco de Manutenção não é atribuído a aeronave específica
 - Solução não é válida para o ambiente operacional



- PROBLEMA DE RECUPERAÇÃO DA MALHA
- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA
- **CARACTERIZAÇÃO/MODELAGEM DE DADOS**
- METODOLOGIA
- RESULTADOS
- CONCLUSÕES/PRÓXIMOS PASSOS

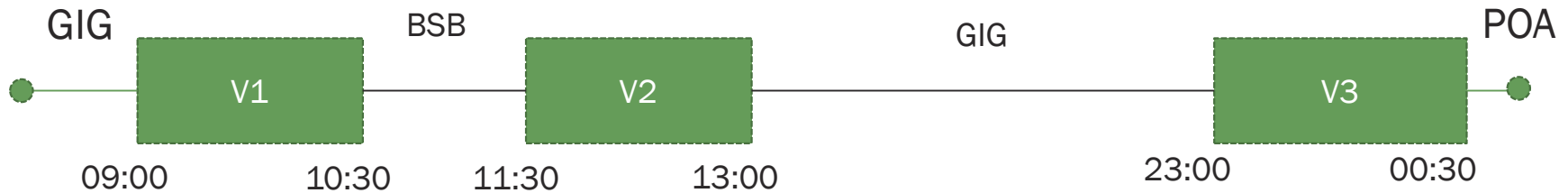
CARACTERIZAÇÃO/MODELAGEM DE DADOS



PROGRAMAÇÃO INICIAL

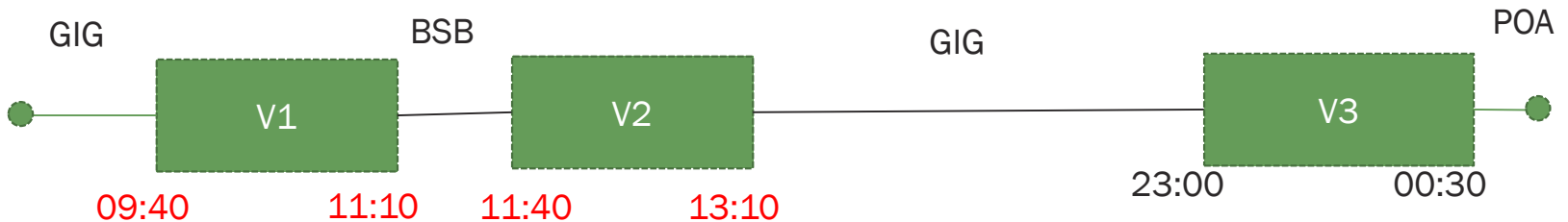
B737 #PR-MLK

TAT = 30 min



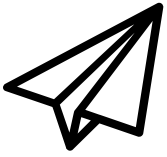
PERTURBAÇÃO

ATRASSO => V1 em 40 min



$$Custo = 40 \times \$10/\text{min} + 10 \times \$10/\text{min} = \$500$$

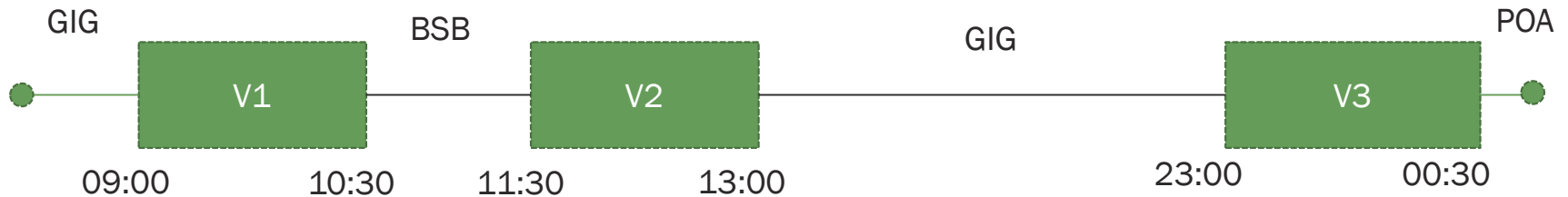
CARACTERIZAÇÃO/MODELAGEM DE DADOS



PROGRAMAÇÃO INICIAL

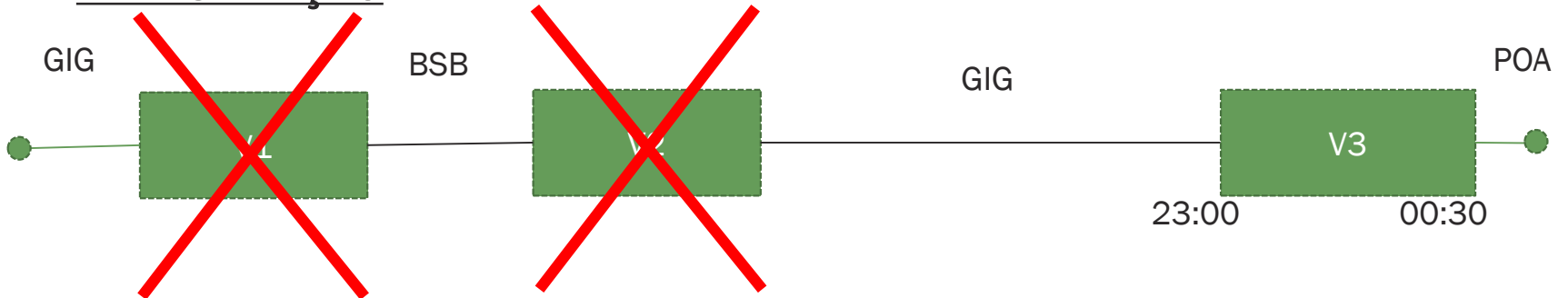
B737 #PR-MLK

TAT = 30 min



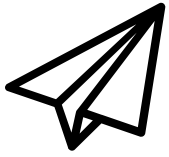
PERTURBAÇÃO

CANCELAMENTO => V2



$$Custo = 2 \times \$20.000/voo = \$40.000$$

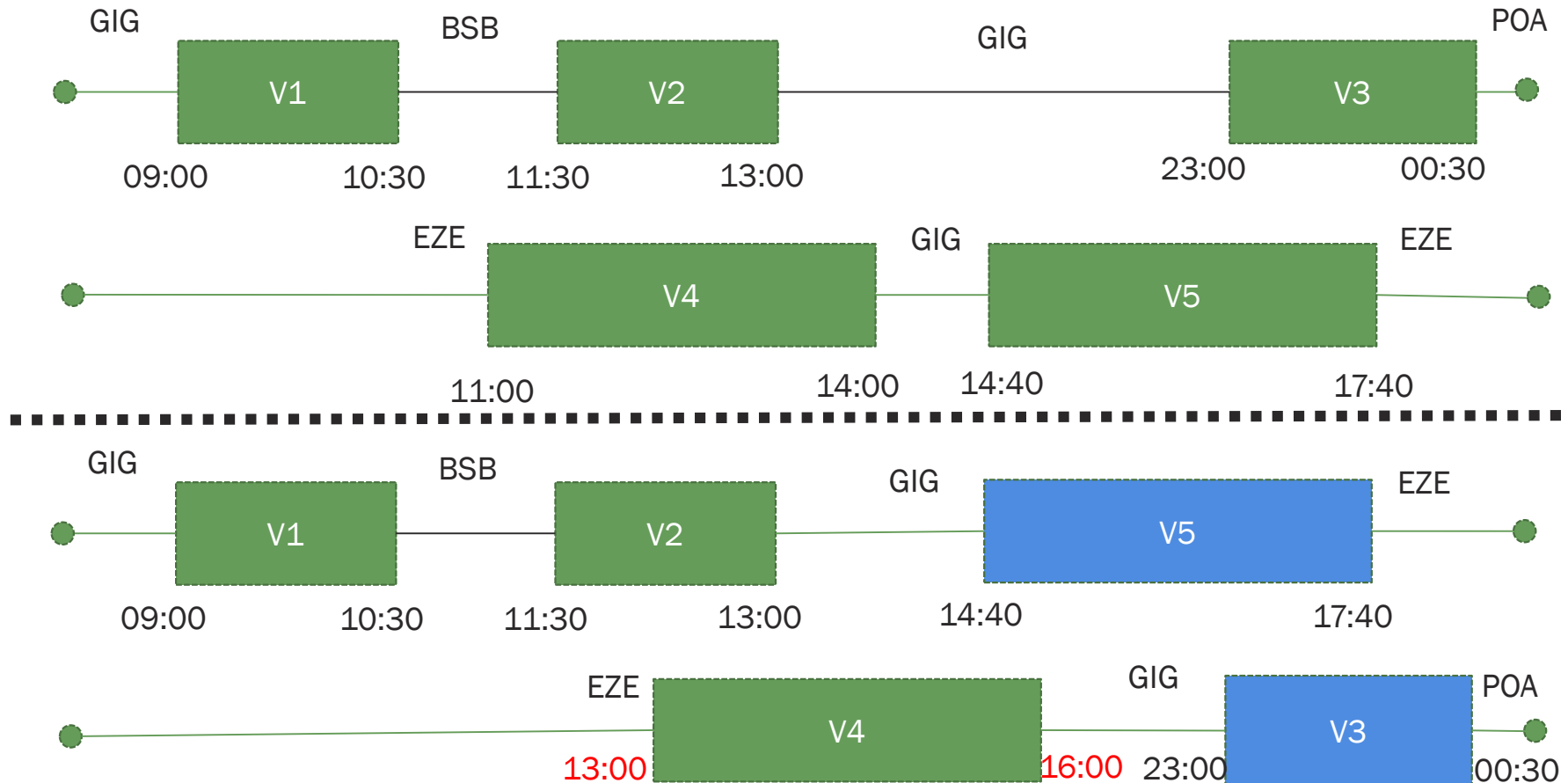
CARACTERIZAÇÃO/MODELAGEM DE DADOS



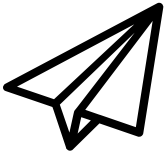
PROGRAMAÇÃO INICIAL

B737 #PR-MLK

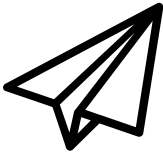
TAT = 30 min



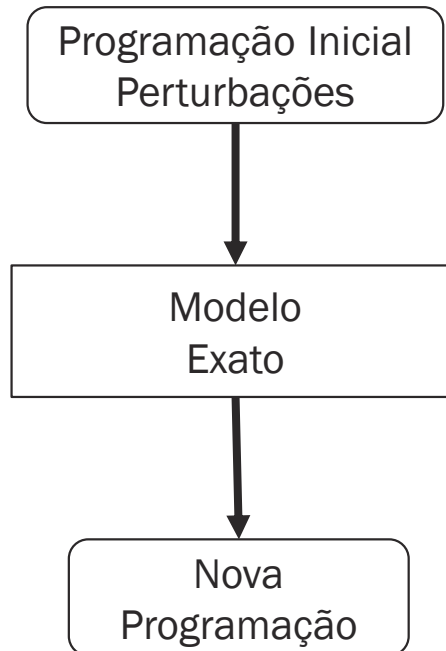
$$Custo = 120 \times \$10/\text{min} + 2 \times \$1/\text{voo} = \$602$$



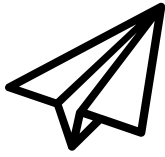
- PROBLEMA DE RECUPERAÇÃO DA MALHA
- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA
- CARACTERIZAÇÃO/MODELAGEM DE DADOS
- **METODOLOGIA**
- RESULTADOS
- CONCLUSÕES/PRÓXIMOS PASSOS



MÉTODO INTEGRADO EXATO



METODOLOGIAS - MÉTODO INTEGRADO EXATO



$$\min \sum_{f \in FC} \sum_{k \in K_f} x_{fck} * cost_delay_swap_{fck} + \sum_{f \in F} y_f * cost_cancel_f \quad \Rightarrow \quad \text{Função Objetivo}$$

Restrições:

$$\sum_{f \in FC} \sum_{k \in K_f} x_{fck} + y_f = 1 \quad \forall f \in F \quad \Rightarrow \quad \text{Cobertura de Voo}$$

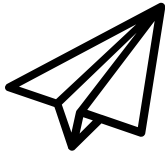
$$n_{input,k}^e + \sum_{f \in FC_{fc\ in}^n} x_{fck} + \sum_{ga \in GA_{g\ in}^n} z_{gak} = \sum_{f \in FC_{fc\ out}^n} x_{fck} + \sum_{ga \in GA_{g\ out}^n} z_{gak} \quad \Rightarrow \quad \text{Balanceamento}$$

$\forall e \in E, \forall n \in \overline{Node_e}, \forall k \in K_e$

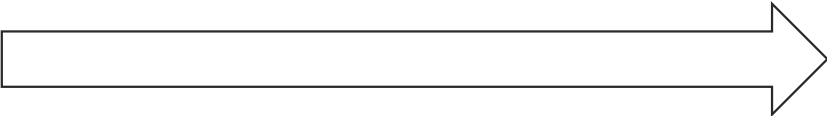
$$\sum_{f \in FC_s} \sum_{k \in K_f} x_{fck} \leq Cap_s \quad \forall s \in Slot \quad \Rightarrow \quad \text{Capacidade Aeroportuária}$$

$$x_{fck} = 1 \quad \forall fck \in FC_m \quad \Rightarrow \quad \text{Manutenção Programada}$$


METODOLOGIAS - MÉTODO INTEGRADO EXATO



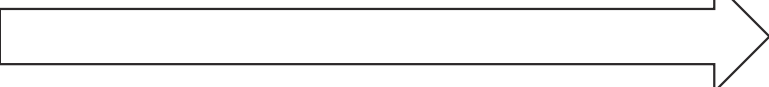
PERTURBAÇÕES

$$\sum_{k \in K_{nout}} z_{gak} = p \quad \forall n \in \overline{Node_{out}}$$



Posicionamento no
Final do Período de
Recuperação

$$\sum_{f \in FC_{delay}} \sum_{k \in K_f} x_{fck} = 0 \quad \forall f \in FC_{delay}$$


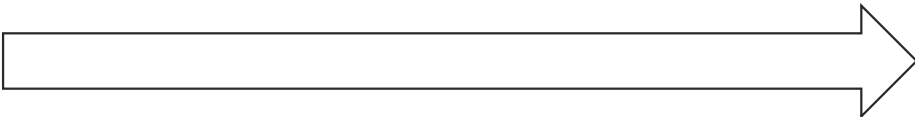
Atraso de Voo

$$y_f = 1 \quad \forall f \in FC_{cancel}$$


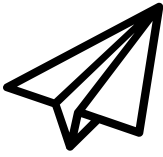
Cancelamento de Voo

$$\sum_{f \in FC_{m_acft}} x_{fck} = 1 \quad \forall fck \in FC_{m_acft}$$


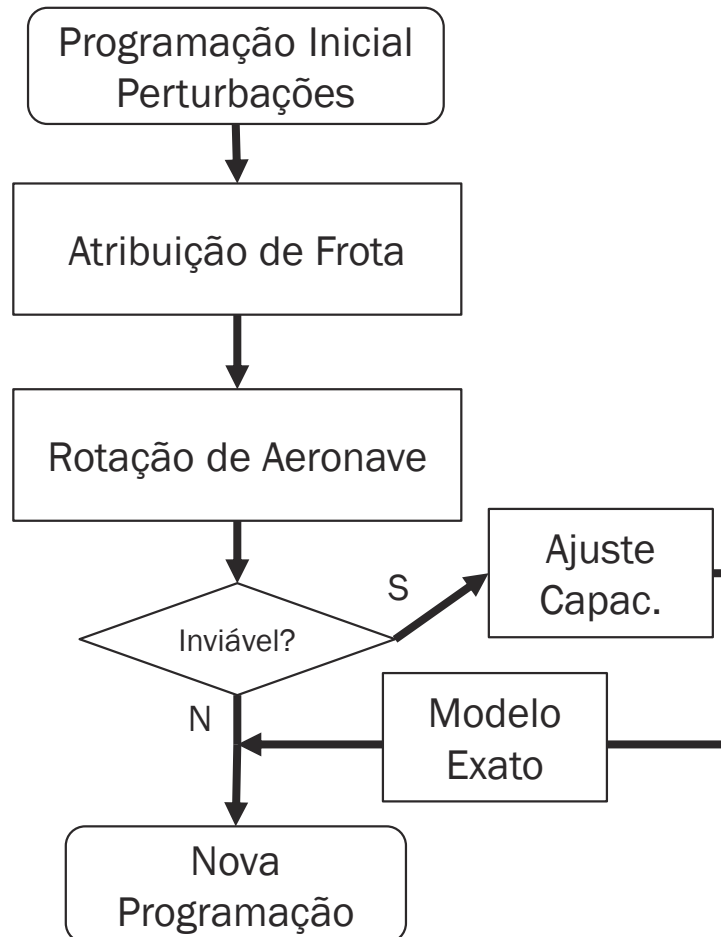
Manutenção
Não-Programada

$$\sum_{f \in FC_s} \sum_{k \in K_f} x_{fck} \leq Cap_s \quad \forall s \in Slot$$


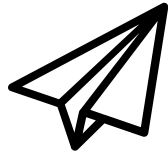
Redução
Capacidade
Aeroportuária



MÉTODO HÍBRIDO

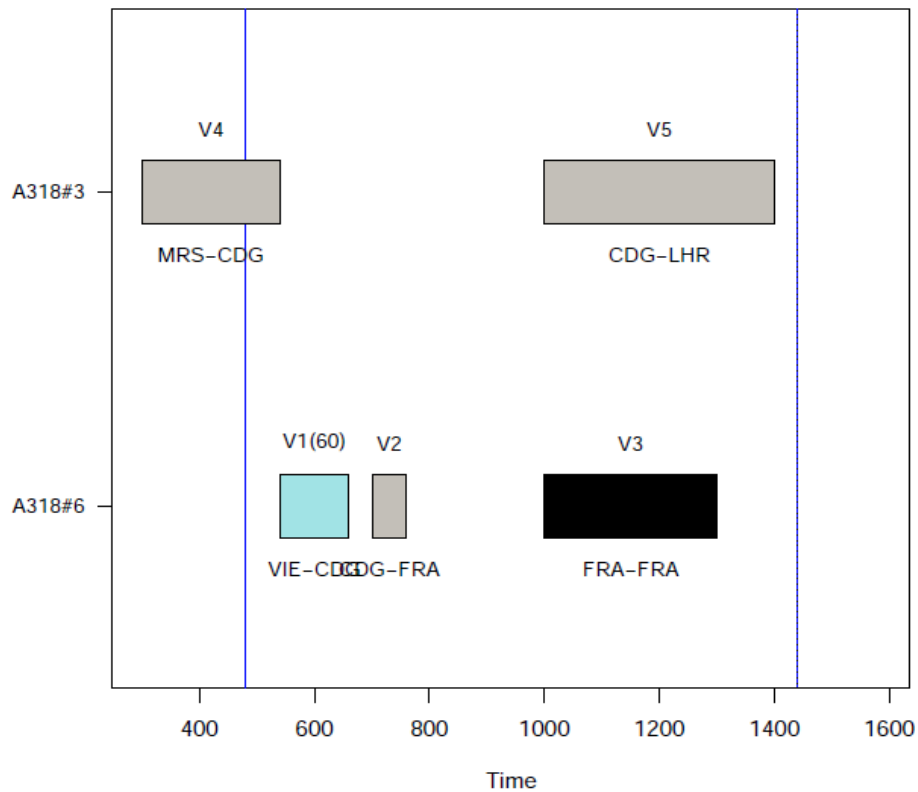


METODOLOGIAS - MÉTODO HÍBRIDO

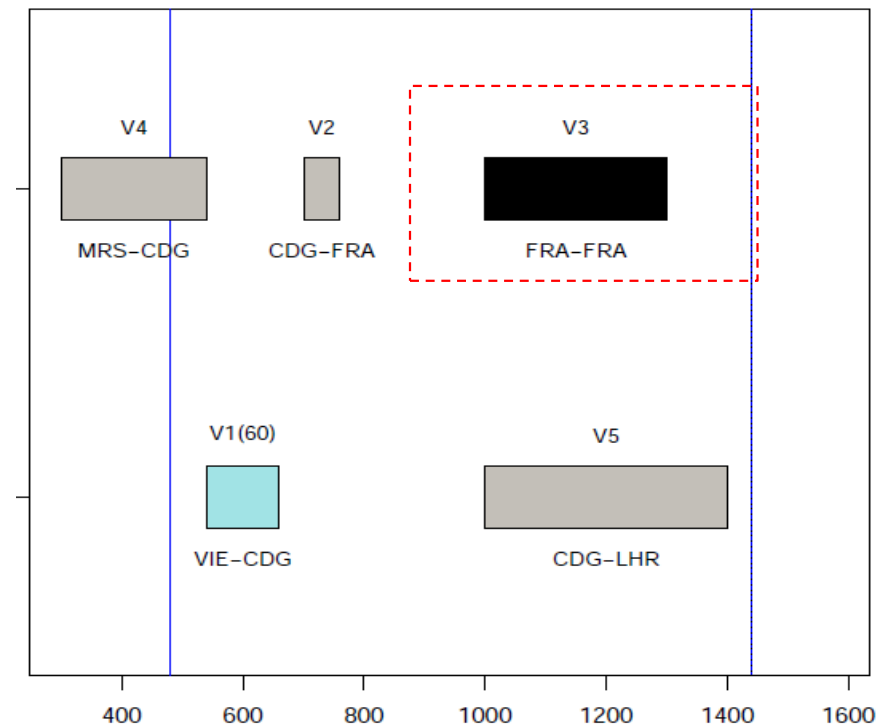


Inviabilidades

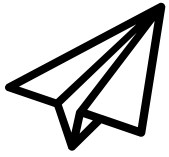
Programação Inicial



Atribuição + Rotação

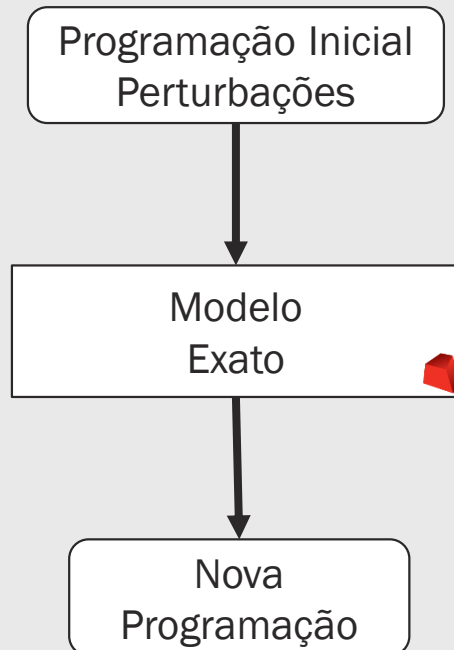


Atraso do 60 min em V1



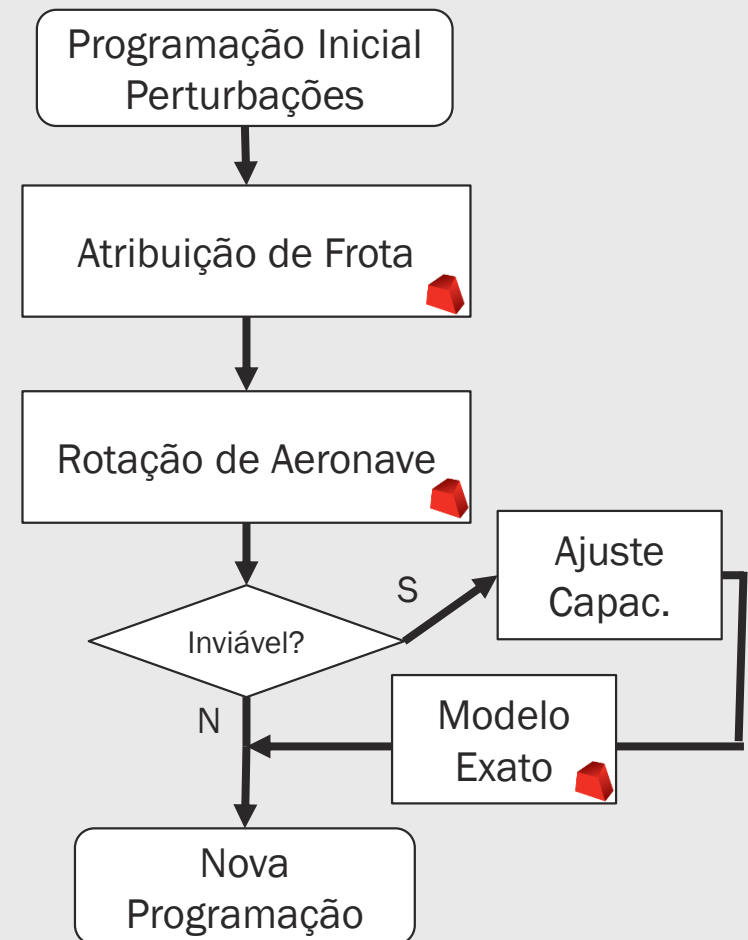
MÉTODO INTEGRADO EXATO

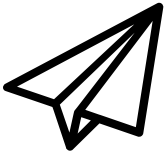
Instâncias Pequenas



MÉTODO HÍBRIDO

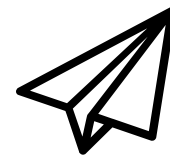
Instâncias Médias e Grandes





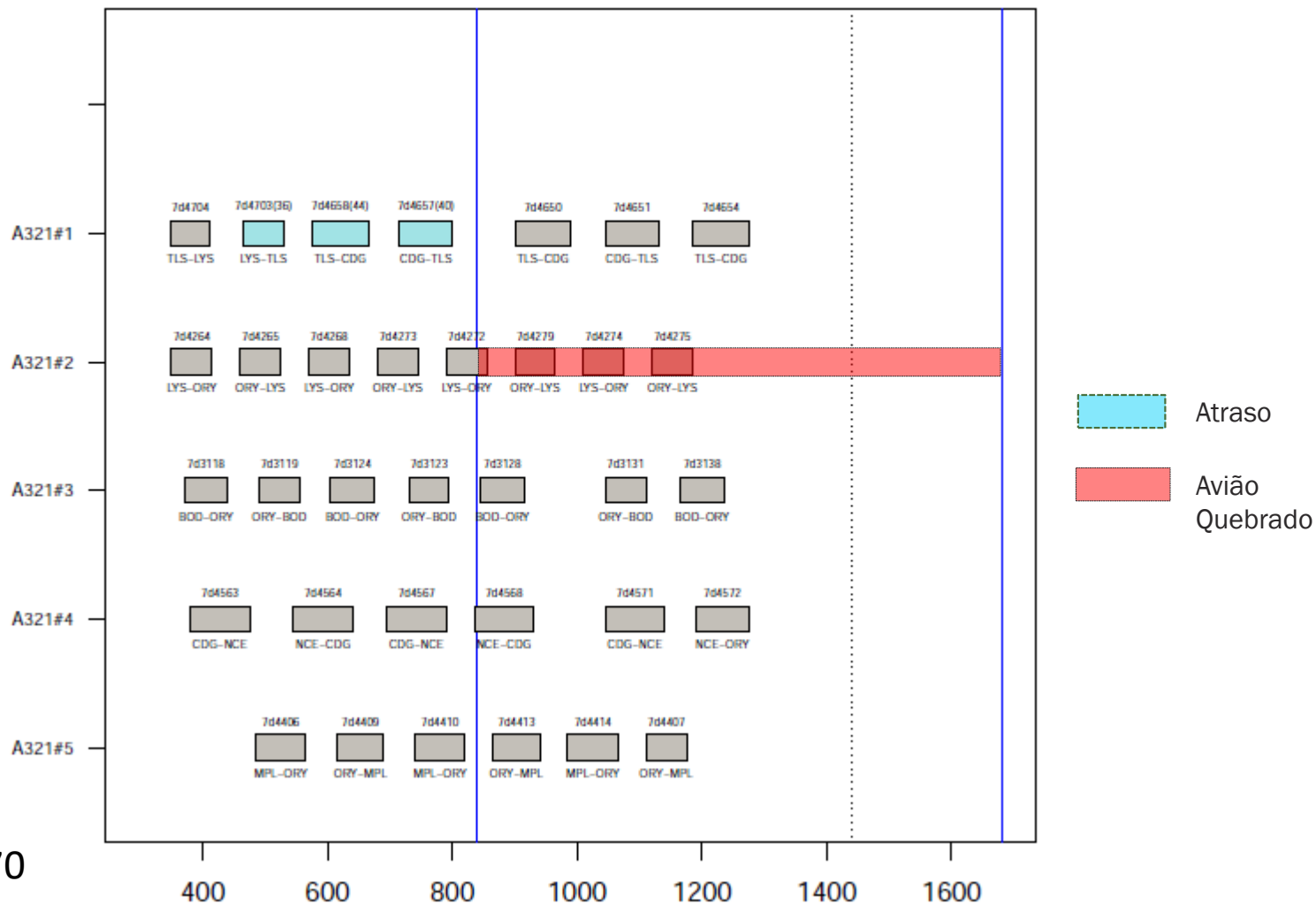
- PROBLEMA DE RECUPERAÇÃO DA MALHA
- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA
- CARACTERIZAÇÃO/MODELAGEM DE DADOS
- METODOLOGIAS
- **RESULTADOS**
- CONCLUSÕES/PRÓXIMOS PASSOS

RESULTADOS – ATRASOS E MANUTENÇÃO



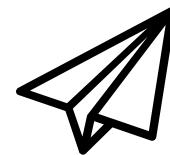
Malha Original

A321_206ASS



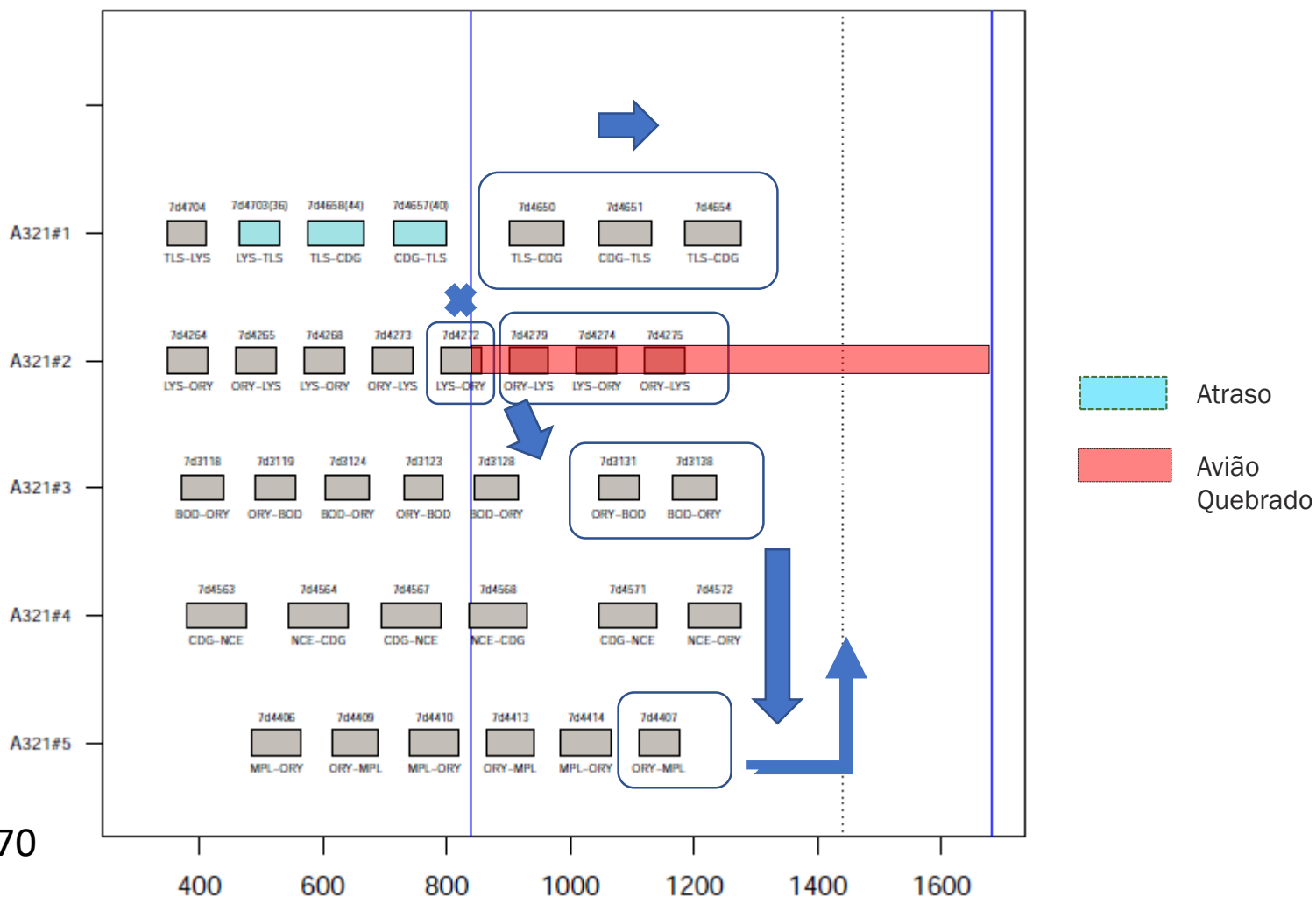
*A03_6088570

RESULTADOS – ATRASOS E MANUTENÇÃO



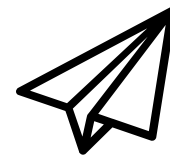
Malha Original

A321_206ASS



*A03_6088570

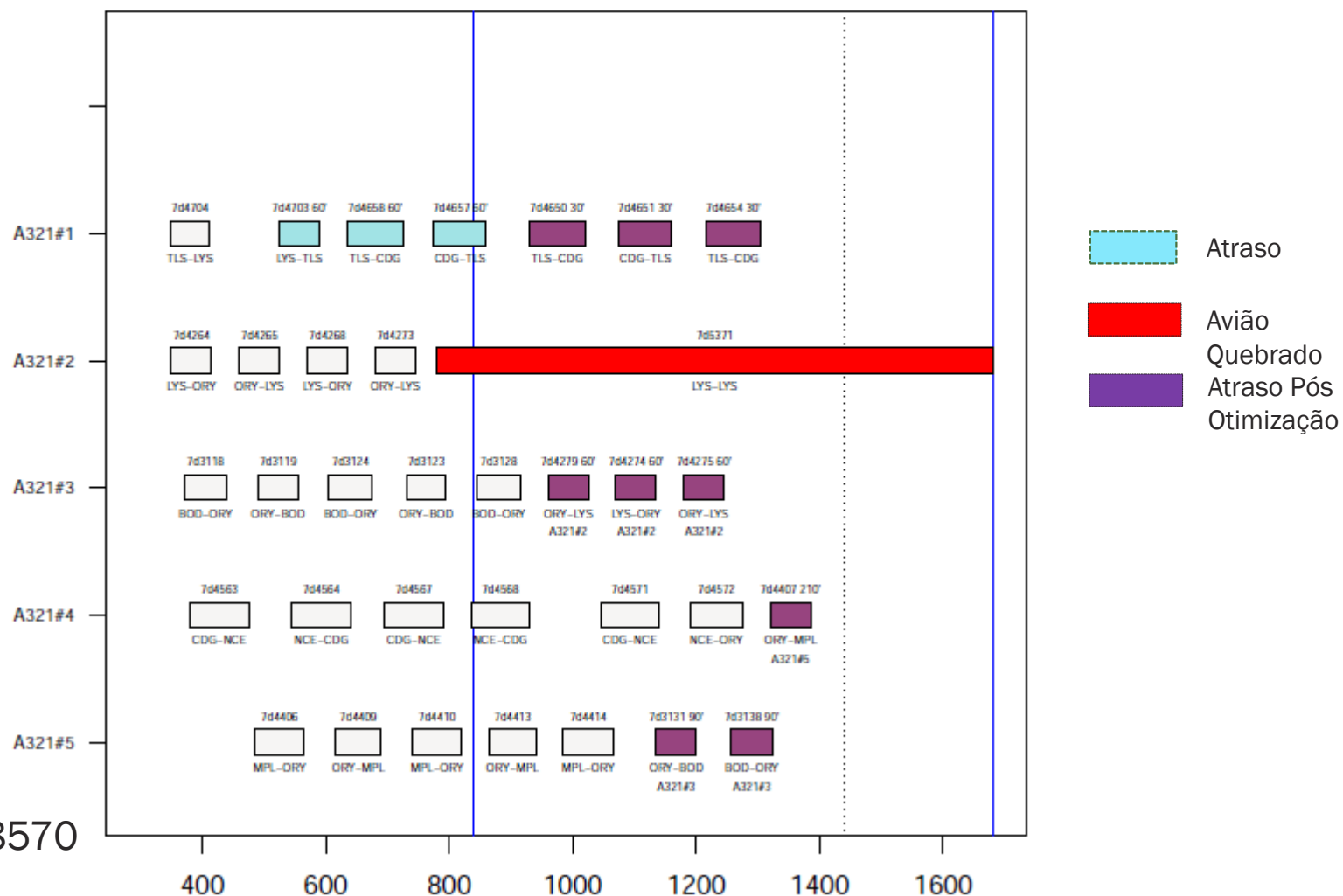
RESULTADOS – ATRASOS E MANUTENÇÃO



Malha Perturbada

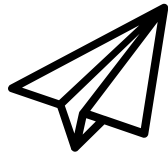
Otimizada

A321_206ASS



*A03_6088570

RESULTADOS – MÉTODO INTEGRADO EXATO

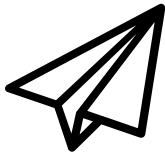


GRUPO A

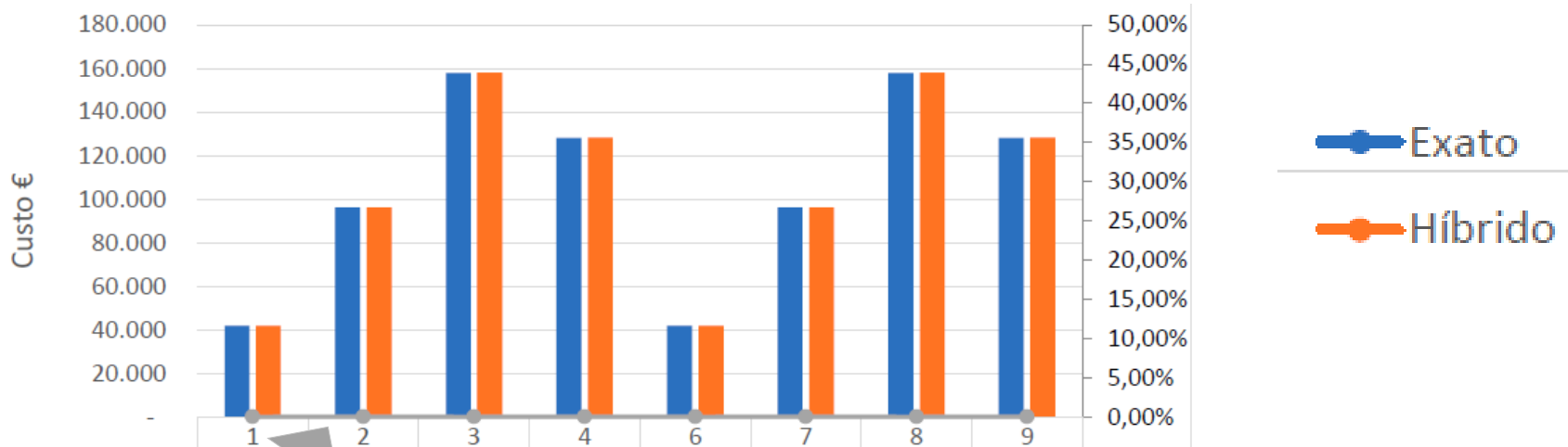
Instâncias Pequenas

Grupo	ID	Δ Reg pp ¹⁴	Δ Pont pp	% swap	GAP	Cost	Time (s)
A	1	0,0	-7,8	11,2%	0,0%	41.752	42
	2	0,0	-4,3	8,0%	0,0%	96.087	48
	3	0,0	-7,0	7,8%	0,0%	157.885	45
	4	0,0	-36,4	17,5%	0,0%	28.181	105
	5						
	6	0,0	-7,8	11,2%	0,0%	41.752	48
	7	0,0	-4,3	8,0%	0,0%	96.087	45
	8	0,0	-7,0	7,8%	0,0%	157.885	46
	9	0,0	-36,4	17,5%	0,0%	128.181	98
	10						

RESULTADOS – MÉTODO HÍBRIDO – GRUPO A



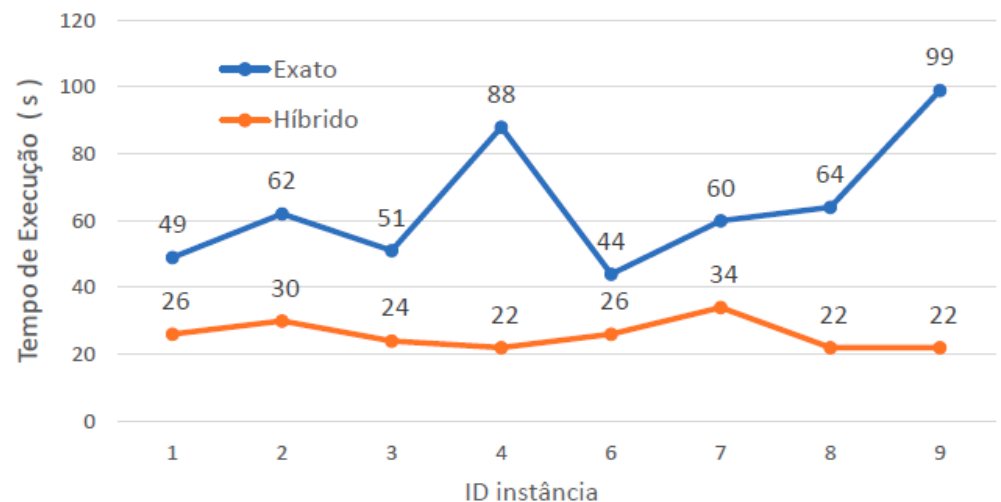
Função Objetivo



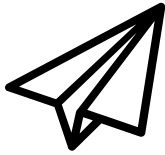
Diferença (%)

Modelo Exato não foi Chamado em nenhuma das Instâncias

Tempo de Execução



RESULTADOS – MÉTODO HÍBRIDO



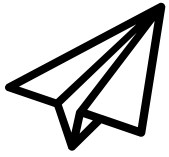
GRUPOS B e C

Instâncias Médias e Grandes

*Modelo Exato foi
Chamado em todas
as Instâncias*

Grupo	ID	Δ Reg Pp	Δ Pont Pp	% swap	GAP	Cost	Time (s)
B	1	-0,5	-10,2	19,2%	0,4%	740.387	885
	2	-1,2	-12,7	25,1%	0,0%	1.738.427	614
	3	-0,6	-10,8	20,9%	0,7%	804.882	904
	4	-0,7	-12,6	24,9%	0,0%	915.331	576
	5	-14,0		14,3%	0,0%	7.359.614	999
	6	-0,5	-10,2	19,2%	0,4%	740.387	869
	7	-1,2	-12,7	25,1%	0,0%	1.738.427	614
	8	-0,6	-10,8	20,9%	0,8%	805.331	926
	9	-0,7	-12,6	24,9%	0,0%	915.331	619
C	1						
	2						
	3	-0,2	-2,7	3,0%	0,0%	350.334	1.126
	4						
	5	0,0	-8,7	11,7%	0,0%	165.104	25
	6	-3,0	-49,6	35,8%	0,0%	1.929.522	638
	7	0,0	-8,7	11,7%	0,0%	165.104	22
	8	-3,0	-49,6	35,8%	0,0%	1.929.522	636
	9	-0,7	-10,7	22,6%	1,1%	831.973	903
	10	-13,5	-12,9	17,2%	0,0%	7.318.530	1.200
	11	-0,7	-10,4	22,2%	0,3%	882.014	912
	12						

RESULTADOS – MÉTODO HÍBRIDO



VALIDAÇÃO DO MÉTODO

GRUPO A

Instâncias Pequenas

Sem Inviabilidade

$GAP \leq 0,01\%$

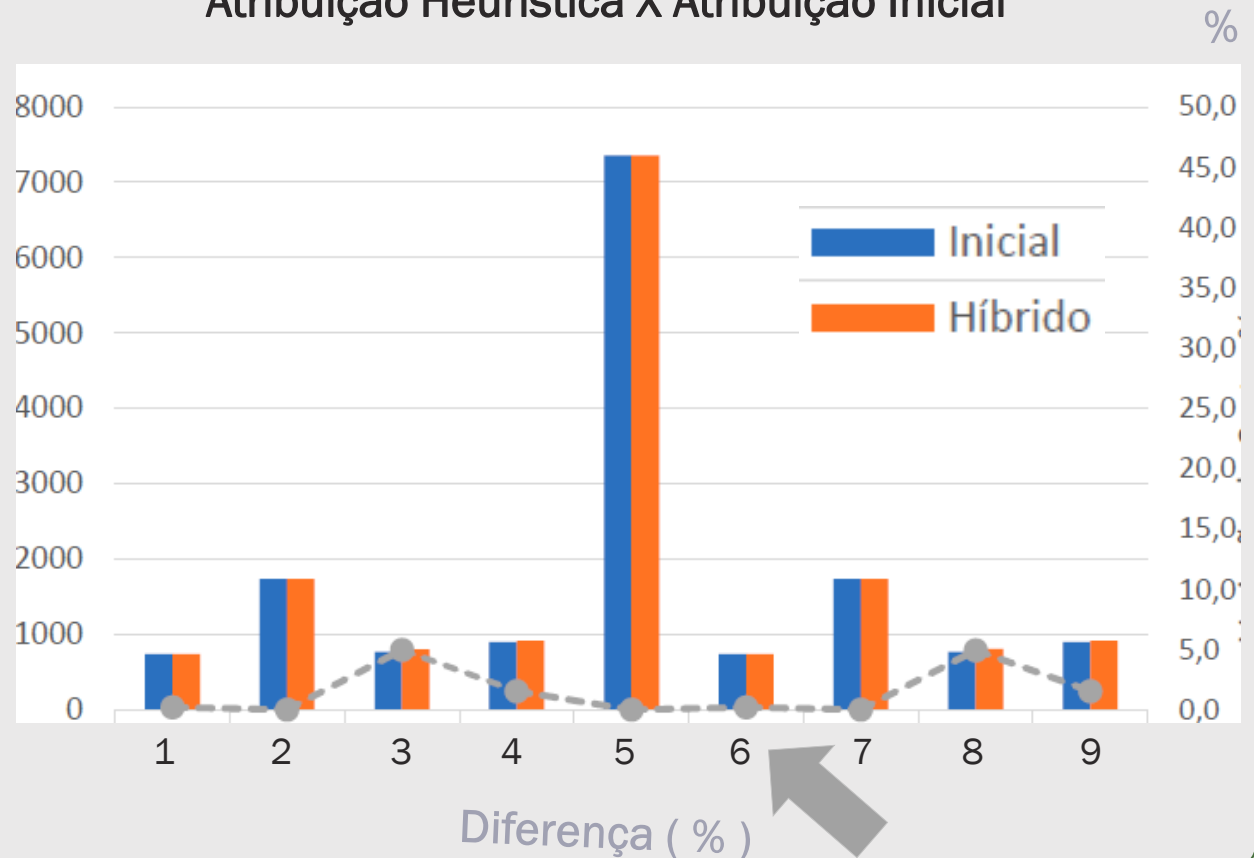
Inviabilidade

$GAP \leq 2,00\%$

GRUPOS B

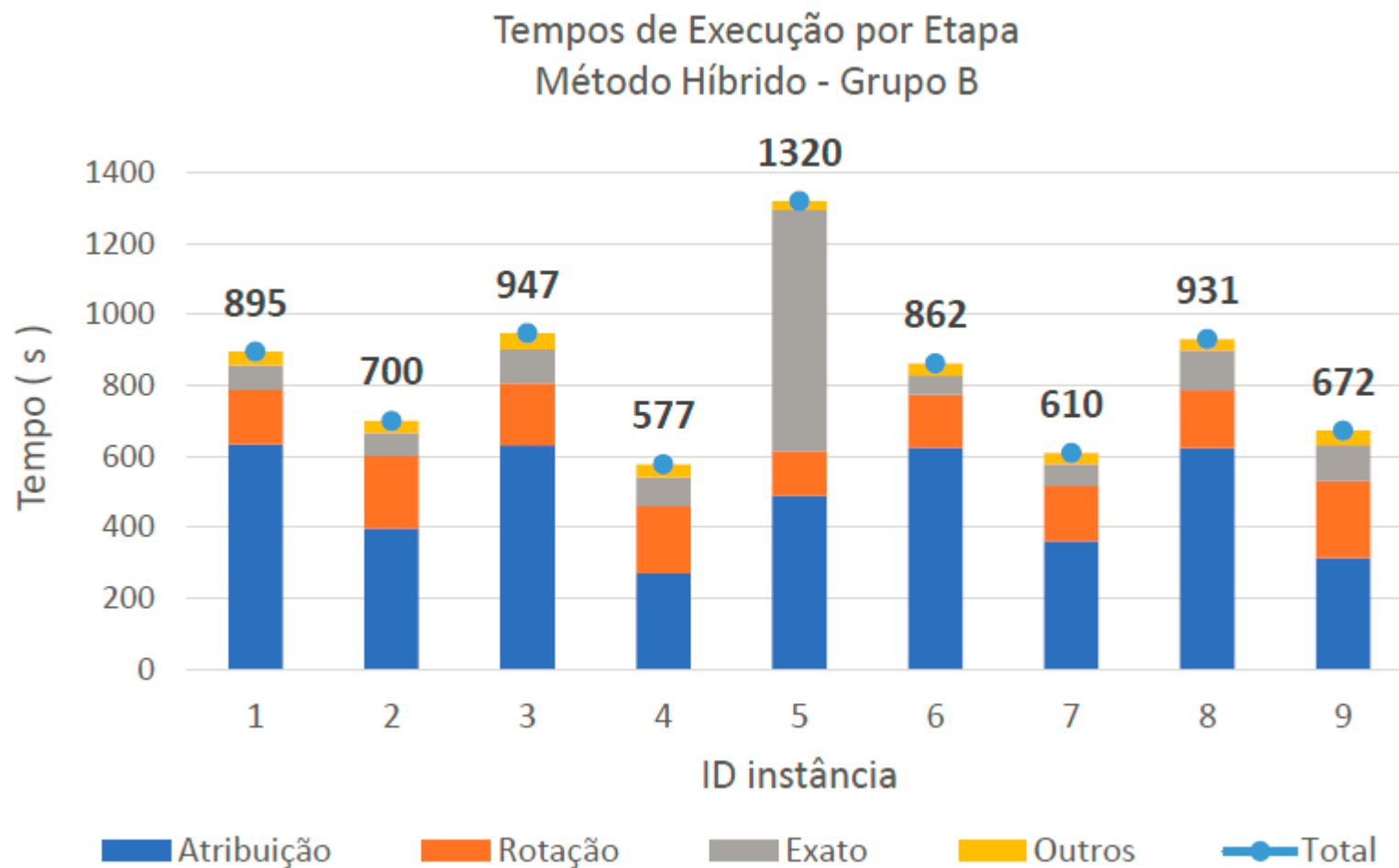
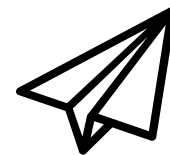
Instâncias Médias e Grandes

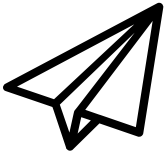
Atribuição Heurística X Atribuição Inicial



RESULTADOS - MÉTODO HÍBRIDO

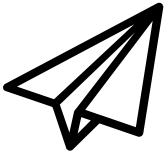
Análise do Tempo de Execução





- PROBLEMA DE RECUPERAÇÃO DA MALHA
- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA
- CARACTERIZAÇÃO/MODELAGEM DE DADOS
- METODOLOGIAS
- RESULTADOS
- **CONCLUSÕES/PRÓXIMOS PASSOS**

CONCLUSÕES/PRÓXIMOS PASSOS



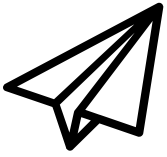
Próximos Passos

- Aprofundar Validação de Dados (**3 semanas**)
 - Provocar Inviabilidades nas Instância do Grupo A
 - Rodar o Método Exato para uma Instância do Grupo B por alguns dias

- Análises do Efeito das Perturbações (**2 semanas**)
 - Perturbação Isolada
 - Perturbações Combinadas

- Análise do Relaxamento da Restrição de Posicionamento (**2 semanas**)

- Investigação dos Resultados das Instâncias do Grupo C (**2 semanas**)



Conclusões Preliminares

- Foi alcançada a recuperação da malha em praticamente qualquer malha;
- O tempo de processamento variou entre alguns segundos até vinte minutos;
- A validação da heurística sugere que o método alcance um GAP de até 5%;
- As manutenções foram modeladas e alocadas da forma correta, ou seja, às aeronaves específicas pertinentes;
- Os resultados são aplicáveis à realidade dos centros de controle operacionais.