

Otimização da Escala de Tripulação em Esquadrão de Transporte Aéreo

Alocador de Missões com Programação Linear Inteira Mista

C95 / C97 / C98

BRANCH-AND-BOUND

HiGHS

SciPy

01

Cenário operacional

02

Premissas e simplificação

03

Restrições do modelo

04

Função objetivo

05

Evolução V1 → V5

06

Metodologia final e versão em Python

07

Validação com voos de 2025

08

Referências

ESCALA DIÁRIA DE TRIPULANTES

- Missão acionada pelo COMAE
- Planejamento de rota e pernoites feito pela SOP
- Missão local planejada conforme demanda (instrução/CVI/EEXD)
- Sobreaviso operacional para ANVs em sede – SBV

ATIVOS OPERACIONAIS

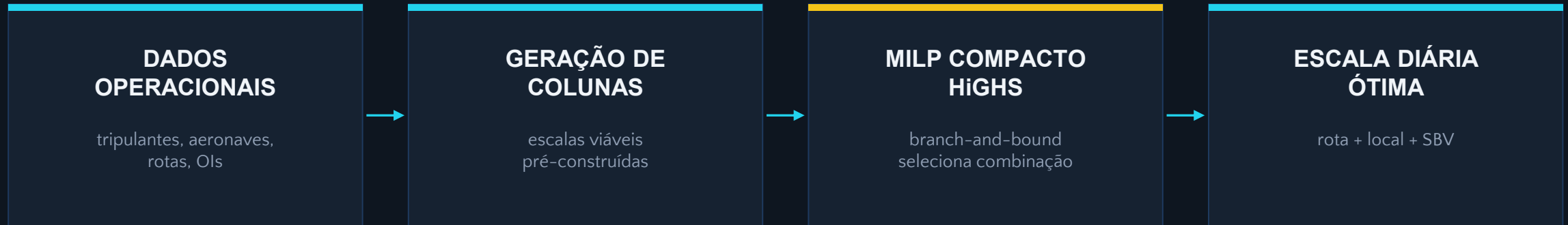
- 3 Projetos: C95, C97 e C98
- 32 pilotos

ATRIBUTOS DOS TRIPULANTES

- QT e qualificação
- progressão através do PAOP 2026
- OIs concluídas
- Indisponibilidades

FONTES DE DADOS

- Banco de dados tripulantes
- Catálogo de OIs
- Progresso de OIs



ESTRUTURA DA COLUNA CANDIDATA

[aeronave + tipo de escala + dupla + OI / ficha + rota + score]

VARIÁVEL $x_j \in \{0,1\}$ — escolher ou não cada coluna candidata

COBERTURA / RECURSOS

- Cada tripulante: no máximo 1 vez no dia
- Toda rota acionada: Cobertura exata (1x)
- Aeronave livre: Rota acionada ou Sobreaviso
- Aeronave em rota não voa local no mesmo dia
- No máximo 1 missão local por aeronave**
- Um subprograma por dia por piloto

**Simplificação (Manutenção / SESQAE)

INSTRUÇÃO / QUALIFICAÇÃO

- AL não tira Sobreaviso
- Em voos com OI: Ficha só para o tripulante 1
- Tripulante 2 deve ser IN adaptado na aeronave
- Respeitar fadiga do piloto
- Respeitar indisponibilidades e qualificação

$$\text{Máx } \sum \text{score}_{milp_j} \cdot x_j$$

CRITÉRIOS SELECIONÁVEIS

<code>menor_custo</code>	Reduz custo financeiro
<code>meta_50</code>	Prioriza pilotos < 50 h
<code>meta_110</code>	Prioriza pilotos < 110 h
<code>equalizar_quadrinhos</code>	Balanceia Sobreaviso

TRATAMENTO DOS DADOS

- Esboço do problema
- Transformar várias fontes em uma única e útil
- Experiência funcional foi suporte
- QTs, Operacionalidade, Posto (Diárias), PAOP, Subprograma, Esforço por missão, ANVs, Tempo de voo
- Parte mais trabalhosa do processo

Nº	Tripulante	Posto	Soldo	QT	Qualificação	Subprograma	OBS	Horas	Subprograma	OBS	Horas	Horas	Qualificação	
								C97	C95		C97	2021	final d	
24	LRS	2T	8.179,00	C98	PB	SPFO-2 SPMO-1	Realiza a missão 03TT03D01	37				36,5	PO	
25	PFR	2T	8.179,00	C98	PB	SPFO-2 SPMO-1 SPMO-3	Realiza a missão 03TT03D01	42				41,5	PO	
26	RCH	2T	8.179,00	C98	PB	SPFO-2 SPMO-1	Realiza a missão 03TT03D01	37				36,5	PO	
27	BEN	2T	8.179,00	C98	PB	SPFO-2 SPMO-1	Realiza a missão 03TT03D01	37				36,5	PO	
28	SCA	2T	8.179,00	C98	PB	SPMO-3 SPMO-1 SPFO-2	Realiza a missão 03TT03D01	41				40,5	PO	
29	ATA	2T	8.179,00	C95	PB					SPMO-1 SPMO-5 CESTA BÁSICA		45,5	45,5	PB
30	NSC	2T	8.179,00	C98	AL	SPMO-1 SPFO-1 SPFO-2		91				90,5	PO	
31	SOL	2T	8.179,00	C95	PB			4		SPMO-1 SPMO-5 CESTA BÁSICA		45,5	49,5	PB

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
	aeronave	subprograma	ordem	oi	tev_horas	esforco	tipo_missao	eh_piloto	observacao					
2	C95	SPFO-2		1 69TF01DN03	10:00	PEO	ROTA	VERDADEIRO	Voo em rota (cheque)					
3	C95	SPFO-2		2 69TF01D04	01:00	PEO	LOCAL	VERDADEIRO	Realização de pouso/decolagem em pista crítica (não é obrigatória para a homologação)					
4	C95	SPMO-1		1 69TS01D01	01:00	Simulador	Simulador	VERDADEIRO	Proc. Normais e Emergências 1P					
5	C95	SPMO-1		2 69TS01D01	01:00	Simulador	Simulador	VERDADEIRO	Proc. Normais e Emergências 1P					
6	C95	SPMO-1		3 69TS01D01	01:00	Simulador	Simulador	VERDADEIRO	Proc. Normais e Emergências 1P					
7	C95	SPMO-1		4 69TS01D01	01:00	Simulador	Simulador	VERDADEIRO	Proc. Normais e Emergências 1P					
8	C95	SPMO-1		5 69TS01D02	01:00	Simulador	Simulador	VERDADEIRO	Proc. Normais e Emergências 2P					
9	C95	SPMO-1		6 69TS01D02	01:00	Simulador	Simulador	VERDADEIRO	Proc. Normais e Emergências 2P					
10	C95	SPMO-1		7 69TS01D02	01:00	Simulador	Simulador	VERDADEIRO	Proc. Normais e Emergências 2P					
11	C95	SPMO-1		8 69TS01D02	01:00	Simulador	Simulador	VERDADEIRO	Proc. Normais e Emergências 2P					
12	C95	SPMO-1		9 06TT36D01	01:00	SESQAE	LOCAL	VERDADEIRO	Navegação a Baixa Altura/Low Contour					
13	C95	SPMO-1		10 06TT36D02	01:00	SESQAE	LOCAL	VERDADEIRO	Navegação a Baixa Altura/Low Contour (NV)					
14	C95	SPMO-1		11 05TT05D01	01:00	SESQAE	LOCAL	VERDADEIRO	Voo de Formatura (Ala Operacional)					
15	C95	SPMO-1		12 05TT05D02	01:00	SESQAE	LOCAL	VERDADEIRO	Voo de Formatura (Ld de Elemento)					
16	C95	SPMO-1		13 05TT05D03	01:00	SESQAE	LOCAL	VERDADEIRO	Voo de Formatura (Ld de Seção)					
17	C95	SPMO-1		14 69TT01D01	06:00	PEO	ROTA	VERDADEIRO	Voo em rota / Deslocamento para FIEX					
18	C95	SPMO-1		15 69TT01D01	30:00:00	PMC	ROTA	VERDADEIRO	Voo em rota / Deslocamento para FIEX					
19	C95	SPMO-1		16 50TT46D01	00:15	SPREP	LOCAL	VERDADEIRO	Lançamento de Pessoal - Método semiautomático processo PREC - Diurno - 1P					

V1/V2— Primeiros Pipelines Operacionais

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	data	aeronave	tipo_escala	trip1	trip2	oi_trip1	oi_trip2	observacao					
2	2026-01-02	C97	MISSAO_L	STS	LPS	01TF01D2:	17TL17D3:	Missão local planejada para evolução no PAOP					
3	2026-01-02	C98	MISSAO_L	DOG	MCH	01TL01D3:	01TL01D3:	Missão local planejada para evolução no PAOP					
4	2026-01-02	C95	SBV	BRJ	BMK	Sobreaviso: tripulação descansada para eventual missão de rota							

trip1	trip2	upla_valid	oi_trip1	rograma_1	horas1	prioridade1	oi_trip2	rograma_1	horas2	prioridade2	coluna_id	aeronave	ipo_colun	neficio_p	aridade_m	score
DOG	MCH	#####	01TL01D3:	SPQE-3	40	1	01TL01D3:	SPQE-3	34	1	1	C98	LOCAL	74	1	73
DOG	MCH	#####	01TL01D3:	SPQE-3	40	1	01TT01D0:	SPMO-1	34	50	2	C98	LOCAL	74	25,5	48,5
DOG	MCH	#####	01TT01D0:	SPMO-1	40	50	01TL01D3:	SPQE-3	34	1	3	C98	LOCAL	74	25,5	48,5
DOG	SCA	#####	01TL01D3:	SPQE-3	40	1	01TT01D0:	SPMO-1	40,5	60	5	C98	LOCAL	80,5	30,5	50
DIL	DOG	#####	01TT01D0:	SPMO-1	39,5	60	01TL01D3:	SPQE-3	40	1	34	C98	LOCAL	79,5	30,5	49
MCH	SCA	#####	01TL01D3:	SPQE-3	34	1	01TT01D0:	SPMO-1	40,5	60	23	C98	LOCAL	74,5	30,5	44
DIL	MCH	#####	01TT01D0:	SPMO-1	39,5	60	01TL01D3:	SPQE-3	34	1	36	C98	LOCAL	73,5	30,5	43
DOG	MCH	#####	01TT01D0:	SPMO-1	40	50	01TT01D0:	SPMO-1	34	50	4	C98	LOCAL	74	50	24
DOG	KVN	#####	01TL01D3:	SPQE-3	40	1	01TT01D0:	SPMO-1	133	100	7	C98	LOCAL	173	50,5	122,5
KVN	MCH	#####	01TT01D0:	SPMO-1	133	100	01TL01D3:	SPQE-3	34	1	47	C98	LOCAL	167	50,5	116,5
BMK	DOG	#####	01TT01D0:	SPMO-1	122	100	01TL01D3:	SPQE-3	40	1	55	C98	LOCAL	162	50,5	111,5
DOG	GMS	#####	01TL01D3:	SPQE-3	40	1	01TT01D0:	SPMO-1	118	100	9	C98	LOCAL	158	50,5	107,5
BMK	MCH	#####	01TT01D0:	SPMO-1	122	100	01TL01D3:	SPQE-3	34	1	57	C98	LOCAL	156	50,5	105,5
GMS	MCH	#####	01TT01D0:	SPMO-1	118	100	01TL01D3:	SPQE-3	34	1	70	C98	LOCAL	152	50,5	101,5
DOG	PFR	#####	01TL01D3:	SPQE-3	40	1	01TT01D0:	SPMO-1	41,5	100	11	C98	LOCAL	81,5	50,5	31
DOG	MDO	#####	01TL01D3:	SPQE-3	40	1	01TT01D0:	SPMO-1	38	100	13	C98	LOCAL	78	50,5	27,5
DOG	LRS	#####	01TL01D3:	SPQE-3	40	1	01TT01D0:	SPMO-1	36,5	100	15	C98	LOCAL	76,5	50,5	26
DOG	RCH	#####	01TL01D3:	SPQE-3	40	1	01TT01D0:	SPMO-1	36,5	100	17	C98	LOCAL	76,5	50,5	26
DOG	SUG	#####	01TL01D3:	SPQE-3	40	1	01TT01D0:	SPMO-1	36,5	100	19	C98	LOCAL	76,5	50,5	26
BEN	DOG	#####	01TT01D0:	SPMO-1	36,5	100	01TL01D3:	SPQE-3	40	1	90	C98	LOCAL	76,5	50,5	26
MCH	PFR	#####	01TL01D3:	SPQE-3	34	1	01TT01D0:	SPMO-1	41,5	100	25	C98	LOCAL	75,5	50,5	25
MCH	MDO	#####	01TL01D3:	SPQE-3	34	1	01TT01D0:	SPMO-1	38	100	27	C98	LOCAL	72	50,5	21,5
CFF	DOG	#####	01TT01D0:	SPMO-1	32	100	01TL01D3:	SPQE-3	40	1	115	C98	LOCAL	72	50,5	21,5
DOG	FIA	#####	01TL01D3:	SPQE-3	40	1	01TT01D0:	SPMO-1	31	100	21	C98	LOCAL	71	50,5	20,5

ERROS/CONCLUSÕES

- Validou a lógica operacional inicial
- Ainda heurístico
- Sem otimização global do dia
- Alunos fazendo ficha juntos
- Sem sequenciamento de Subprogramas
- Lógica muito elementar ainda

MÉTODO — Geração de Colunas → Seleção MILP

Crew scheduling: geração de colunas candidatas + set partitioning resolvido com Python e HiGHS

MÉTODO EXATO



⚙️ O QUE MUDOU

- Saída da lógica puramente heurística.
- Cada escala possível vira uma coluna candidata.
- Cada coluna vira variável binária: escolher ou descartar.
- O solver busca a melhor combinação global do dia.

🏢 IMPLEMENTAÇÕES

- Entradas operacionais em CSV/planilhas.
- Geração de candidatos por aeronave.
- Restrições de cobertura, disponibilidade e qualificação.
- Missão acionada, voo local e SBV separados.
- Primeira estrutura de MILP no problema real.

✓ GANHO DA VERSÃO

- Deixa de escolher apenas “bons candidatos”.
- Passa a comparar combinações completas de escala.
- Cria a base lógica para a versão final.

DADOS



COLUNAS CANDIDATAS



MILP



ESCALA ESCOLHIDA

⚙️ CÓDIGO

- Excesso de bugs no código.
- Forte dependência entre os scripts.
- Estrutura difícil de manter e evoluir.

⚠️ OPERAÇÃO

- Geração de candidatos lenta em dias cheios.
- Escala sensível a pequenas mudanças de entrada.
- Pouca margem para ajuste manual do planejador.

✓ APRENDIZADO

- O modelo exato provou-se viável.
- Faltava robustez de engenharia de software.
- Decisão de reescrever a solução do zero.

ORGANIZAÇÃO

- Código reescrito e modularizado.
- Scripts redundantes e obsoletos removidos.
- Regras operacionais consolidadas.



MODELO

- MILP simplificado e mais estável.
- Missão acionada, voo local e SBV tratados.
- Restrições de cobertura e qualificação revisadas.



✓ PRODUTO

- Relatório único na aba ESCALA DIARIA.
- Saída amigável gerada com openpyxl.
- Base pronta para virar ferramenta operacional.

■ O QUE FALTAVA

- Prioridade entre rota, voo local e SBV.
- Interface mais amigável para o planejador.
- Suporte a simulação de cenários.

⚠ RISCO PERCEBIDO

- Modelo correto, mas pouco acessível.
- Uso ainda dependente de quem o criou.
- Risco de baixa adoção operacional.

✓ DECISÃO FINAL

- Reescrever em Python com `scipy.optimize.milp`.
- Resolver com o solver HiGHS.
- Entregar ferramenta validada em operação.

CONCLUSÃO DA V4

O modelo estava correto, mas precisava virar uma ferramenta operacional validada.

IMPLEMENTAÇÕES

- Interface web local amigável
- Botão: salvar parâmetros e gerar escala
- Arquivos .bat para facilitar abertura
- Histórico automático de horas voadas
- Atualização de horas e SBV por tripulante
- Evitar duplicidade ao regerar escala da mesma data (retirada para testes)
- Prioridade através de bônus

HIERARQUIA DE PRIORIDADE

ROTA_AÇIONADA

score + 100000

MISSAO_LOCAL

score + 1000

SBV

score próprio



Escalante Pastor

Planejador diario de missoes e sobreaviso - 2 ETA

Parametros

Data de planejamento

Hoje automatico

Critério de missao

meta_50

Critério SBV

equalizar_quadriinhos

Missao acionada

Existe missao de rota acionada

Origem

NT

Destino

NT

Data de decolagem

Aeronaves

C98

Disponivel em sede

Em pane

Ja em missao de rota

Hora livre

50:00

C97

Disponivel em sede

Em pane

Ja em missao de rota

Hora livre

50:00

C95

Disponivel em sede

Tripulantes disponiveis

Selecione quem esta disponivel

AEU

ATA

BEN

BMK

BRI

BRJ

CFF

DIL

DOG

FIA

GMR

GMS

HCK

ISA

JVT

KVN

LPS

LRS

MAT

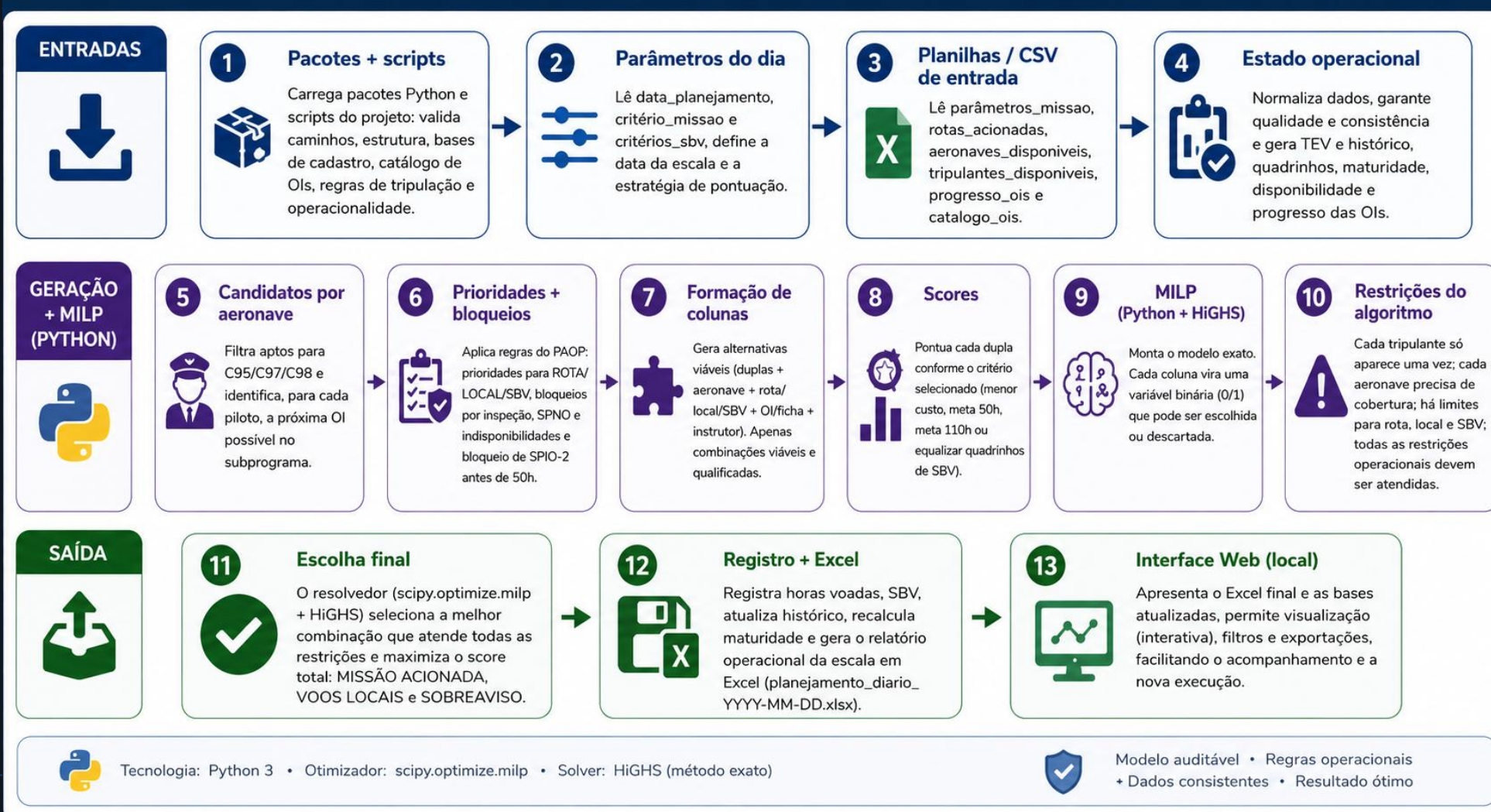
MCH

ERROS/CONCLUSÕES

- Facilidade de inserção de dados
- Maior consciência situacional
- Não mostra andamento na interface

Python + MILP + HiGHS

Ferramenta de apoio à decisão para escala diária de tripulantes



COMO FOI FEITA

- Base usada: **voos reais de 2025**.
- Voos agregados em slots por data, aeronave e tipo de escala.
- Demanda histórica mantida: o modelo não criou novos voos.
- MILP redistribuiu tripulantes compatíveis por QT.
- Restrições: 2 tripulantes por slot; cada tripulante no máx. 1 vez/dia; compatibilidade com aeronave; preservação das horas totais.
- Objetivo: equalizar horas em relação à meta de 50 h.

RESULTADOS

197

slots históricos

394

alocações otimizadas

26

tripulantes

1.860,64 h

horas preservadas

Solver: **solução ótima**

ANTES

- Desvio-padrão: **34,52 h**
- Mínimo: **5,75 h**
- Máximo: **119,33 h**
- Abaixo de 50 h: **8 tripulantes**

DEPOIS

- Desvio-padrão: **8,45 h**
- Mínimo: **64,72 h**
- Máximo: **85,75 h**
- Abaixo de 50 h: **0 tripulantes**

Conclusão A validação retrospectiva preservou a demanda histórica de 2025 e demonstrou que o otimizador reduziu a dispersão das horas voadas, eliminando tripulantes abaixo da meta de 50 h sob as restrições modeladas.

BAZARGAN, Massoud. *Airline Operations and Scheduling*. 2nd ed. Ashgate, 2010.

BELOBABA, Peter; ODONI, Amedeo; BARNHART, Cynthia. *The Global Airline Industry*. Wiley, 2009.

WENSVEEN, John G. *Air Transportation: A Management Perspective*. 8th ed. Routledge, 2016.