

Uma abordagem de gerenciamento do ciclo de vida de frota de aeronaves de defesa baseada em modelo de otimização de duas etapas



Sergio Rebouças

*Instituto Tecnológico de Aeronáutica
São José dos Campos - Brasil*

Fernando Teixeira Mendes Abrahão

*Instituto Tecnológico de Aeronáutica
São José dos Campos - Brasil*

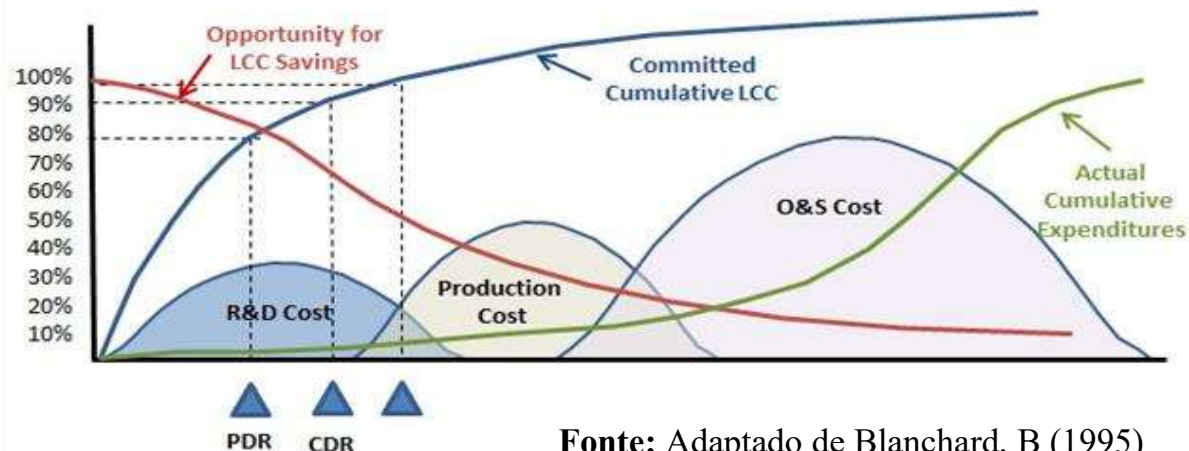
Introdução

**Fundamentação
Teórica**

Metodologia

**Resultados e
Discussão**

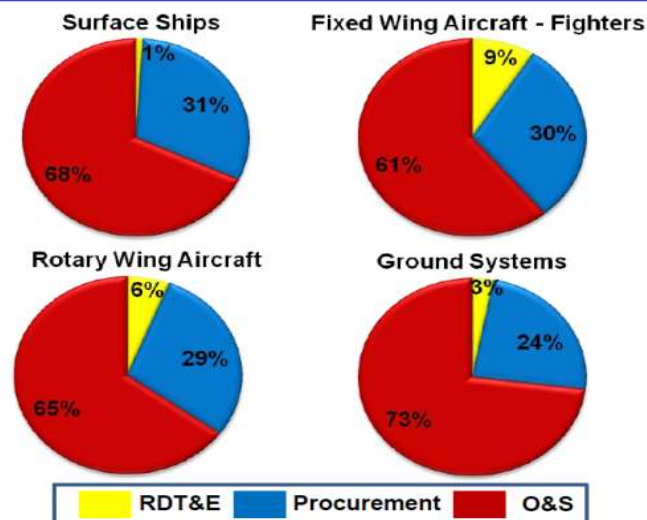
Conclusão



Fonte: Adaptado de Blanchard, B (1995)

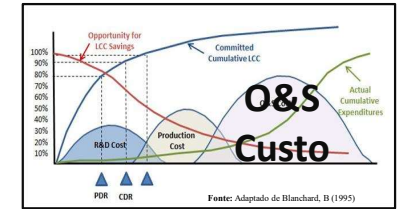


Life Cycle Management Imperative: Total Ownership Cost



**Total Ownership Cost influence and management
are critical in Weapons System Acquisitions**

Source: CAPE, June 2009 Data



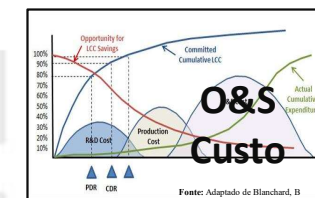
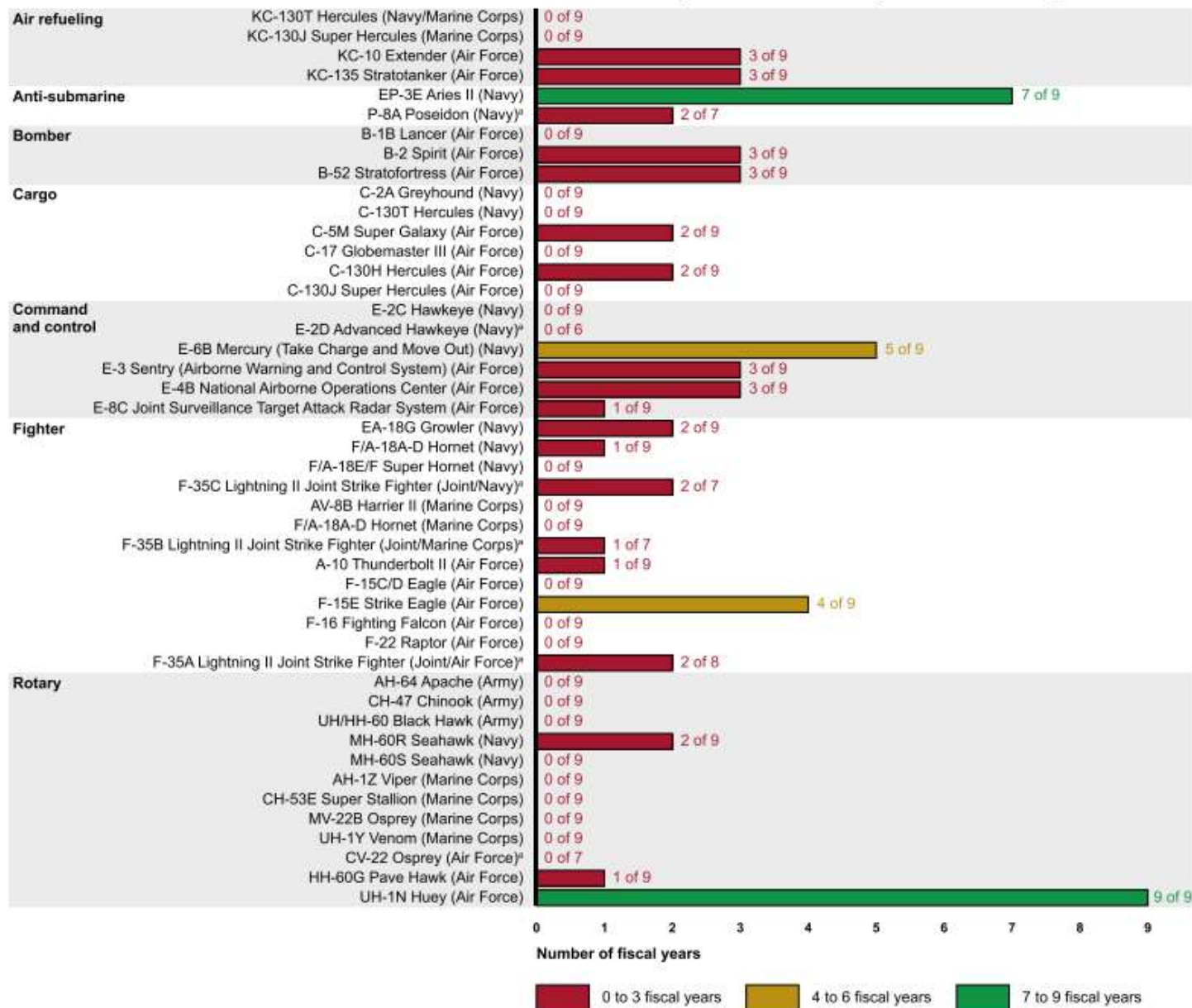
Custo de Operação - *Flight Operating Cost (FOC)*



Fonte: Adaptado de Belobaba, Odoni and Barnhart (2009)



Number of Times Selected Aircraft Met Their Annual Mission Capable Goal, Fiscal years 2011 through 2019



Source: GAO analysis of Army, Navy, and Air Force data. | GAO-21-101SP

*The military departments did not provide mission capable goals for all nine years for these aircraft.

Figure 2: Sustainment Challenges Affecting Selected Department of Defense Aircraft

	Aging aircraft			Maintenance				Supply support		
	Delays in acquiring replacement aircraft	Service life extension ^a	Unexpected replacement of parts and repairs	Access to technical data	Delays in depot maintenance	Shortage of trained maintenance personnel	Unscheduled maintenance	Diminishing manufacturing source ^{ab}	Parts obsolescence ^a	Parts shortage and delay
Air refueling										
KC-130T Hercules (Navy/Marine Corps)		●	●		●				●	●
KC-130J Super Hercules (Marine Corps)		●	●	●	●					●
KC-10 Extender (Air Force)							●			●
KC-135 Stratotanker (Air Force)			●				●		●	
Anti-submarine										
EP-3E Aries II (Navy)						●		●		●
P-8A Poseidon (Navy)				●						●
Bomber										
B-1B Lancer (Air Force)		●					●			●
B-2 Spirit (Air Force)									●	●
B-52 Stratofortress (Air Force)		●	●				●	●	●	●
Cargo										
C-2A Greyhound (Navy)		●	●		●	●	●	●	●	
C-130T Hercules (Navy)		●	●		●				●	
C-5M Super Galaxy (Air Force)			●				●			●
C-17 Globemaster III (Air Force)			●				●	●		
C-130H Hercules (Air Force)			●				●	●	●	●
C-130J Super Hercules (Air Force)			●				●	●	●	●
Command and control										
E-2C Hawkeye (Navy)			●		●	●	●	●	●	●
E-2D Advanced Hawkeye (Navy)					●	●	●	●	●	
E-6B Mercury (Take Charge and Move Out) (Navy)		●				●		●	●	
E-3 Sentry (Airborne Warning and Control System) (Air Force)			●					●		●
E-4B National Airborne Operations Center (Air Force)			●		●					●
E-8C Joint Surveillance Target Attack Radar System (Air Force)			●		●		●			
Fighter										
EA-18G Growler (Navy)					●	●		●	●	●
F/A-18A-D Hornet (Navy/Marine Corps)	●	●	●		●	●	●	●	●	
F/A-18E/F Super Hornet (Navy)		●	●		●	●		●	●	●
F-35ABC Lightning II Joint Strike Fighter (Air Force/Marine Corps/Navy)					●		●			●
AV-8B Harrier II (Marine Corps)	●		●		●	●		●	●	
A-10 Thunderbolt II (Air Force)			●					●		●
F-15C/D Eagle (Air Force)			●				●	●		●
F-15E Strike Eagle (Air Force)			●		●			●		●
F-16 Fighting Falcon (Air Force)		●	●		●		●	●		●
F-22 Raptor (Air Force)			●				●	●		●
Rotary										
AH-64 Apache (Army)					●					●
CH-47 Chinook (Army)			●		●		●	●	●	●
UH/HH-60 Black Hawk (Army)										●
MH-60R Seahawk (Navy)				●		●	●			●
MH-60S Seahawk (Navy)				●		●	●			●
AH-1Z Viper (Marine Corps)							●			●
CH-53E Super Stallion (Marine Corps)		●	●	●	●	●		●	●	●
MV-22B Osprey (Marine Corps)			●	●		●				●
UH-1Y Venom (Marine Corps)						●	●			●
CV-22 Osprey (Air Force)				●	●			●		●
HH-60G Pave Hawk (Air Force)			●		●		●	●	●	●
UH-1N Huey (Air Force)			●				●			●

Source: GAO analysis of Army, Navy, and Air Force information. | GAO-21-101SP

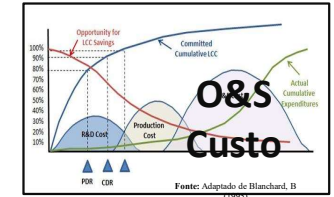


Figure 2: Sustainment Challenges Affecting Selected Department of Defense Aircraft

	Aging aircraft			Maintenance				Supply support		
	Delays in acquiring replacement aircraft	Service life extension ^a	Unexpected replacement of parts and repairs	Access to technical data	Delays in depot maintenance	Shortage of trained maintenance personnel	Unscheduled maintenance	Diminishing manufacturing source ²¹	Parts obsolescence ²¹	Parts shortage and delay
Air refueling										
KC-130T Hercules (Navy/Marine Corps)		•	•		•				•	•
KC-130J Super Hercules (Marine Corps)		•	•	•	•					•
KC-10 Extender (Air Force)							•			•
KC-135 Stratotanker (Air Force)			•				•		•	
Anti-submarine										
EP-3E Aries II (Navy)						•		•		•
P-8A Poseidon (Navy)				•						•
Bomber										
B-1B Lancer (Air Force)		•					•			•
B-2 Spirit (Air Force)									•	•
B-52 Stratofortress (Air Force)		•	•				•	•	•	•
Cargo										
C-2A Greyhound (Navy)		•	•		•	•	•	•	•	
C-130T Hercules (Navy)		•	•		•				•	
C-5M Super Galaxy (Air Force)			•				•			•
C-17 Globemaster III (Air Force)							•	•		•
C-130H Hercules (Air Force)			•				•	•	•	•
C-130J Super Hercules (Air Force)			•				•	•	•	•
Command and control										
E-2C Hawkeye (Navy)			•		•	•	•	•	•	•
E-2D Advanced Hawkeye (Navy)					•	•	•	•	•	•
E-6B Mercury (Take Charge and Move Out) (Navy)		•	•			•		•	•	
E-3 Sentry (Airborne Warning and Control System) (Air Force)			•					•		•
E-4B National Airborne Operations Center (Air Force)			•		•					•
E-8C Joint Surveillance Target Attack Radar System (Air Force)			•		•		•			
Fighter										
EA-18G Growler (Navy)					•	•		•	•	•
F/A-18A-D Hornet (Navy/Marine Corps)	•	•	•		•	•	•	•	•	•
F/A-18E/F Super Hornet (Navy)		•	•		•	•		•	•	•
F-35ABC Lightning II Joint Strike Fighter (Air Force/Marine Corps/Navy)					•		•			•
AV-8B Harrier II (Marine Corps)	•		•		•	•		•	•	
A-10 Thunderbolt II (Air Force)			•					•		•
F-15C/D Eagle (Air Force)			•				•	•		•
F-15E Strike Eagle (Air Force)			•		•			•		•
F-16 Fighting Falcon (Air Force)		•	•		•		•	•	•	•
F-22 Raptor (Air Force)			•				•	•	•	•
Rotary										
AH-64 Apache (Army)			•		•		•	•	•	•
CH-47 Chinook (Army)			•		•		•	•	•	•
UH/HH-60 Black Hawk (Army)										•
MH-60R Seahawk (Navy)				•		•	•			•
MH-60S Seahawk (Navy)				•		•	•			•
AH-1Z Viper (Marine Corps)							•			•
CH-53E Super Stallion (Marine Corps)		•	•	•	•			•	•	•
MV-22B Osprey (Marine Corps)			•	•		•				•
UH-1Y Venom (Marine Corps)				•		•	•	•		•
CV-22 Osprey (Air Force)				•			•	•		•
HH-60G Pave Hawk (Air Force)			•		•		•	•	•	•
UH-1N Huey (Air Force)			•				•			•

Source: GAO analysis of Army, Navy, and Air Force information. | GAO-21-101SP

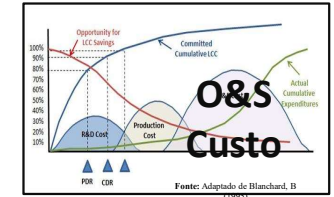
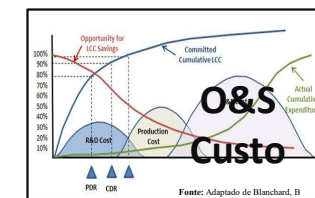


Figure 2: Sustainment Challenges Affecting Selected Department of Defense Aircraft

	Aging aircraft				Access to technical data	Maintenance		Unscheduled maintenance	Supply support		
	Delays in acquiring replacement aircraft	Service life extension ^a	Unexpected replacement of parts and repairs	Delays in depot maintenance		Shortage of trained maintenance personnel	Diminishing manufacturing sources ²¹		Parts obsolescence ²¹	Parts shortage and delay	
Air refueling											
KC-130T Hercules (Navy/Marine Corps)		●	●		●					●	●
KC-130J Super Hercules (Marine Corps)		●	●	●	●						●
KC-10 Extender (Air Force)							●				●
KC-135 Stratotanker (Air Force)			●				●			●	
Anti-submarine											
EP-3E Aries II (Navy)						●			●		●
P-8A Poseidon (Navy)				●							●
Bomber											
B-1B Lancer (Air Force)		●					●				●
B-2 Spirit (Air Force)										●	●
B-52 Stratofortress (Air Force)		●	●				●	●	●	●	●
Cargo											
C-2A Greyhound (Navy)		●	●		●	●	●	●	●	●	
C-130T Hercules (Navy)		●	●		●					●	
C-5M Super Galaxy (Air Force)			●				●				●
C-17 Globemaster III (Air Force)							●	●			
C-130H Hercules (Air Force)			●				●	●	●	●	●
C-130J Super Hercules (Air Force)			●				●	●	●	●	●
Command and control											
E-2C Hawkeye (Navy)			●		●	●	●	●	●	●	●
E-2D Advanced Hawkeye (Navy)					●	●	●	●	●	●	
E-6B Mercury (Take Charge and Move Out) (Navy)		●	●			●		●	●		
E-3 Sentry (Airborne Warning and Control System) (Air Force)			●					●			●
E-4B National Airborne Operations Center (Air Force)			●		●						●
E-8C Joint Surveillance Target Attack Radar System (Air Force)			●		●		●				
Fighter											
EA-18G Growler (Navy)					●	●	●	●	●	●	●
F/A-18A-D Hornet (Navy/Marine Corps)	●	●	●		●	●	●	●	●	●	
F/A-18E/F Super Hornet (Navy)		●	●		●	●	●	●	●	●	●
F-35ABC Lightning II Joint Strike Fighter (Air Force/Marine Corps/Navy)					●		●				●
AV-8B Harrier II (Marine Corps)	●		●		●	●		●	●	●	
A-10 Thunderbolt II (Air Force)			●					●	●		●
F-15C/D Eagle (Air Force)			●				●	●	●		●
F-15E Strike Eagle (Air Force)			●		●			●	●		●
F-16 Fighting Falcon (Air Force)		●	●		●		●	●	●	●	●
F-22 Raptor (Air Force)			●		●		●	●	●	●	●
Rotary											
AH-64 Apache (Army)			●		●		●				●
CH-47 Chinook (Army)			●		●		●	●	●	●	●
UH/HH-60 Black Hawk (Army)									●		●
MH-60R Seahawk (Navy)				●		●	●				●
MH-60S Seahawk (Navy)				●		●	●				●
AH-1Z Viper (Marine Corps)			●	●		●	●				●
CH-53E Super Stallion (Marine Corps)		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
MV-22B Osprey (Marine Corps)			●	●		●					●
UH-1Y Venom (Marine Corps)			●	●			●				●
CV-22 Osprey (Air Force)				●	●			●	●		●
HH-60G Pave Hawk (Air Force)			●		●		●		●		●
UH-1N Huey (Air Force)			●		●		●				●

Source: GAO analysis of Army, Navy, and Air Force information. | GAO-21-101SP



Problema de Pesquisa

- Planejamento da manutenção e de uso de aeronaves de defesa
- Sequenciamento das atividades
- Otimizar relação custo benefício

Objetivo

- Desenvolver nova abordagem para tratar o problema

Originalidade

- Horizonte temporal - O&S
- Manutenção preventiva completa
- Manutenção corretiva da frota e individual

Desafios e objetivos específicos

- **QN1** - Como distribuir o esforço aéreo de uma frota, dada uma capacidade de manutenção específica?
 - **OE1.** Desenvolver modelo de distribuição de esforço aéreo da frota e de manutenção
- **QN2** - É possível estabelecer a disponibilidade operacional máxima possível para uma frota de aeronaves, dado um cenário operacional específico?
 - **OE2.** Desenvolver modelo de otimização de planejamento de manutenção de aeronaves de longo-prazo
- **QN3** - É possível atingir a disponibilidade operacional máxima e planejar a manutenção preventiva de maneira a atender a demanda de esforço aéreo?
 - **OE3.** Desenvolver modelo de otimização de planejamento de manutenção de aeronaves de médio/curto-prazo integrado ao de longo-prazo; e
- **QN4** - Como avaliar a capacidade de pronta-resposta de uma frota de aeronaves militares?
 - **OE4.** Simular cenários para análise e avaliação dos resultados, da aplicabilidade e robustez do modelo, comparando o novo modelo ao modelo convencional de planejamento da manutenção.

Proposta

- **Algoritmos de otimização** permitem a definição das melhores alternativas de **planejamento** de manutenção e uso da frota, em toda a fase de operação, **garantindo a melhoria de uma relação custo-benefício desejada.**

Contribuição

- Acadêmica – **lacuna em termos de otimização de operações aéreas militares (planejamento de longo prazo e inclusão de diversas restrições de manutenção).**
- Melhoria no processo de planejamento da manutenção e alocação de aeronaves – **redução de custos e incremento da disponibilidade da frota;**
- Auxílio para a **prospecção de requisitos operacionais e logísticos** de sistemas aeroespaciais complexos – **desenvolvimento ou aquisição; e**

Fundamentação Teórica

- Gerenciamento de Frota
 - Manutenção de Aeronaves
 - Planejamento de Manutenção e Alocação de Aeronaves
 - Indicadores
- Métodos de Otimização
 - Programação Linear (exato)
 - Meta-heurísticas (não exatos)
 - Simulação (validação dos resultados)

Planejamento da Manutenção

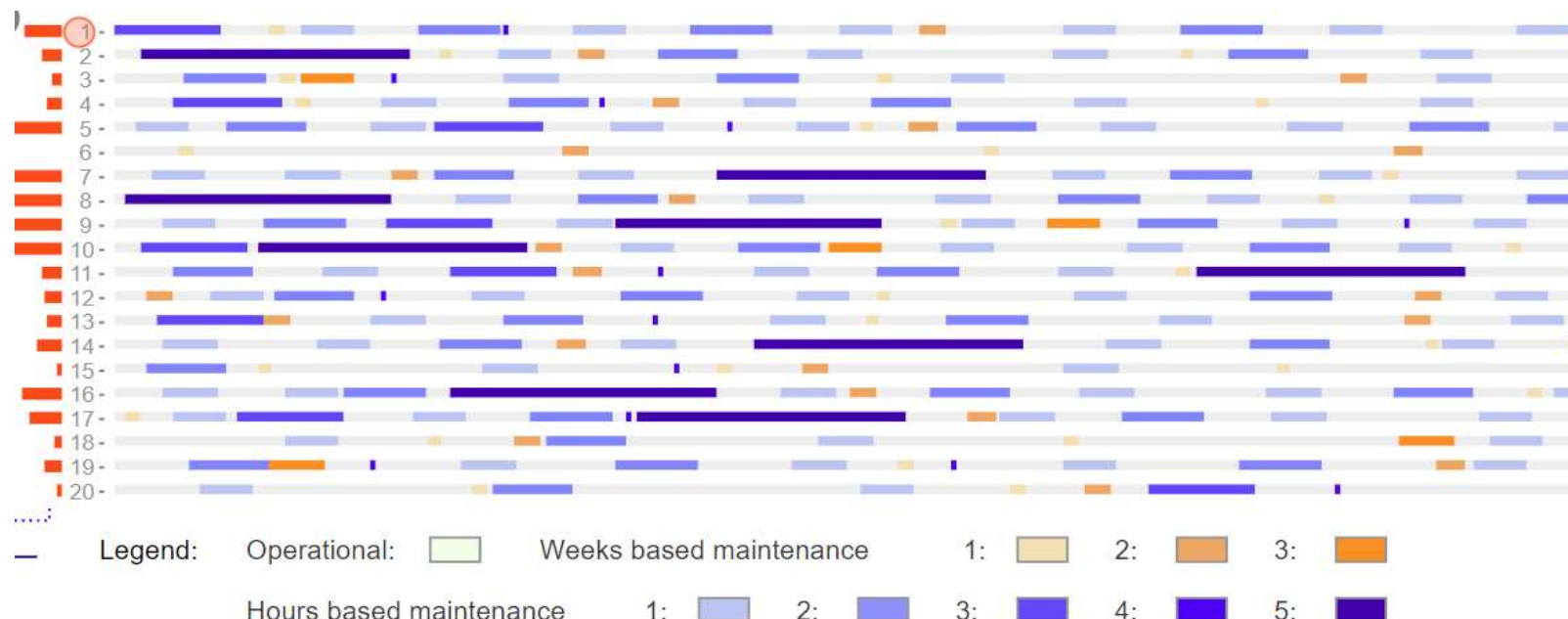
Demanda de Esforço Aéreo

5%	5%	8%	7%	10%	11%	9%	10%	11%	10%	8%	5%	7332,00
378	401	569	507	746	828	668	756	786	711	614	362	
Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	



Tipo de Inspeção	Horas de voo	Tempo de MNT (dias)
INSP 50FH	50	21
INSP 100FH	100	28
INSP 200FH	200	105
INSP 1000FH	1000	180

MTBF
MTBUMA
MTTR
A₀
P.R/Desp.



Planejamento da Manutenção

Demanda de Esforço Aéreo

5%	5%	8%	7%	10%	11%	9%	10%	11%	10%	8%	5%	7332,00
378	401	569	507	746	828	668	756	786	711	614	362	
Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	



Tipo de Inspeção	Horas de voo	Tempo de MNT (dias)
INSP 50FH	50	21
INSP 100FH	100	28
INSP 200FH	200	105
INSP 1000FH	1000	180

MTBF
MTBUMA
MTTR
A₀
P.R/Desp.



Escala de Voo - 2º/8º GAv

DATA: 02 out 2018.(terça-feira)

COPIAS FISICAS:		E-MAIL:							
-S3		-AIS MIL							
-Q AVISO HANGAR		-CMT							
-CASA DE PISTA		-ALERTA MED							
-SALA BRIEF 2		-OPO							
Horario	Cod. Chamada	Pilotos	Mecânicos	OE	SR	Codigo OI	Tempo	Area	Obs.
13:00Z	POTI BRANCO	GIA/TUG				60HT005	00:50	TRAF	FAB 8961 2075L+2x00L (PEO LD EL GIA-1P/TUG-IN)
		VIT/VRL				60HT003	00:50		FAB 8959 2075L+2x00L (PMO 1P VIT-1P/VRL-IN)
15:00Z	POTI AZUL	NAT/MRL	SUL/RON			60HT005	00:50	TRAF	FAB 8961 2075L+2x00L (REV PEO LD EL NAT-1P/MRL-IN)
		PAU/FEN	WBR/DRE			60HT033	00:50		FAB 8959 2075L+2x00L (PFO POSA PAU-IN/FEN-AL)
17:30Z	POTI 212	BUT/IRI	GOE			01HT009	01:00	TRAF	FAB 8959 2075L+2x00L (REV PFO 1P MAO-1P/IRI-IN)

Indicadores

$$A_o = \frac{\text{Tempo Disponível}}{\text{Tempo Disponível} + \text{Tempo Indisponível}}$$

$$= \frac{\text{MTBM}}{\text{MTBM} + \text{MDT}} = \frac{\text{TO} + \text{TE}}{\text{TO} + \text{TE} + \text{TMP} + \text{TMC} + \text{TAAL}}$$

MTBM = tempo médio entre manutenções (*mean time between maintenance*)

MDT = tempo total de parada por manutenção (*mean maintenance downtime*)

TO = Tempo de Operação

TE = Tempo de Espera (parado, porém disponível para uso)

TMP = Tempo Total de Manutenção Preventiva

TMC = Tempo Total de Manutenção Corretiva

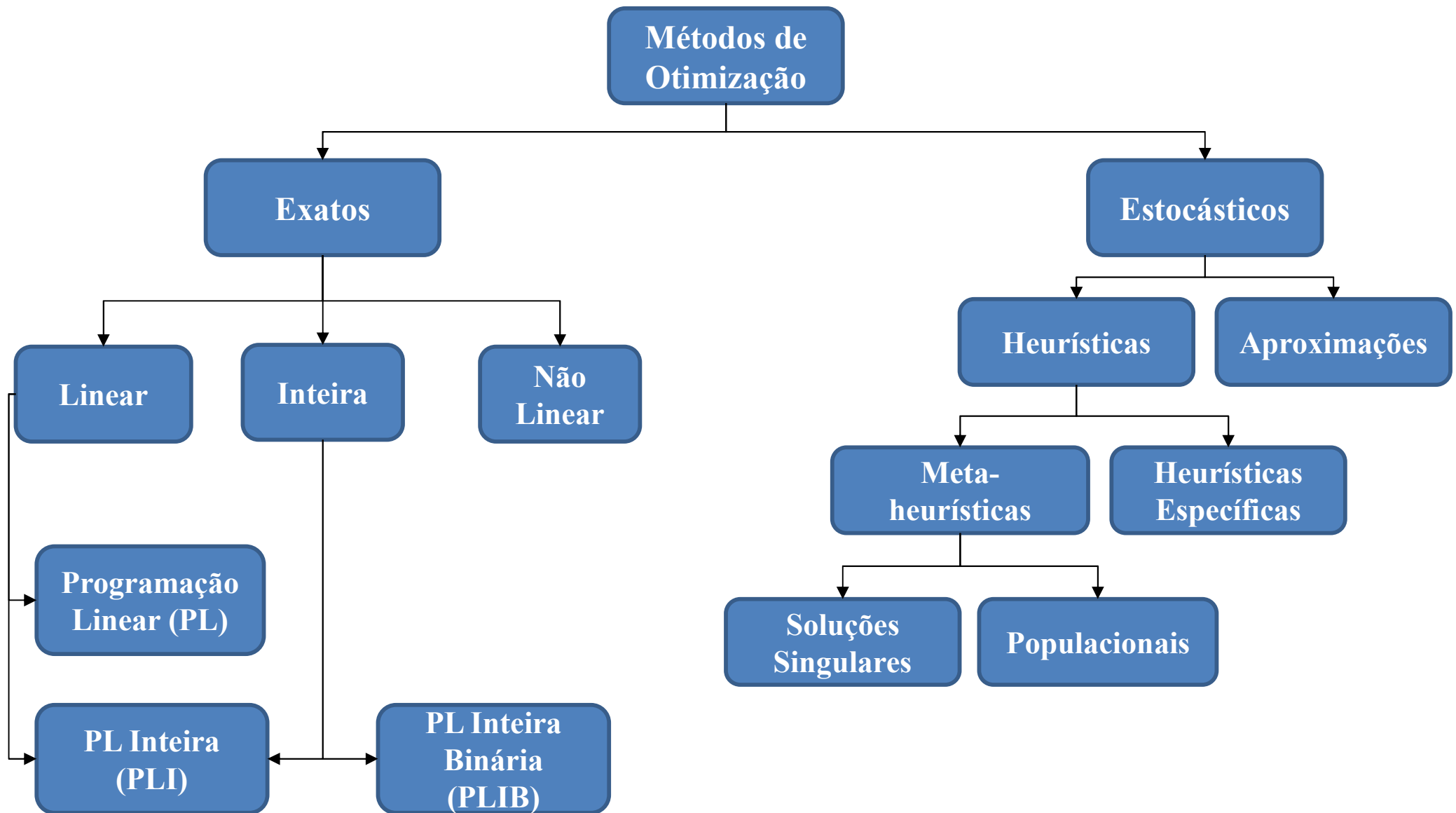
TAAL = Tempo Total Atraso Administrativo e Logístico

$$SR(\%) = \frac{SM - MM}{SM}$$

MM = missão não executada
(*“missed mission”*)

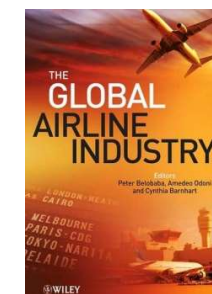
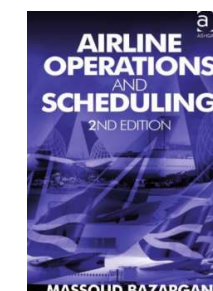
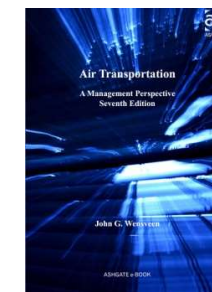
SM = missão programada
(*“scheduled mission”*)

Métodos de Resolução de Problemas de Otimização



Revisão de Literatura

- Problemas de otimização no gerenciamento de operações aéreas são da classe NP-Hard (*nondeterministic polynomial time*), o que implica elevada complexidade computacional (tempo de processamento)
- São tratados de forma isolada, divididos em subproblemas menores como: a) flight scheduling; b) fleet assignment; c) aircraft/maintenance routing issues; e d) crew scheduling problems.
- Flight Scheduling (Timetabling) – rotas e horários
- Fleet assignment – associar tipo de aeronaves à escala
- Aircraft Routing (TAP–Tail Assignment Problem) – associar individualmente aeronave à escala
- AMRP – Aircraft Maintenance Routing Problem
- Flight and Maintenance Planning*
- Crew Scheduling – alocação de tripulações às rotas, horários ou aeronaves
- Planejamento de pessoal de manutenção e suporte
- Disruption and Recovery



Planejamento da manutenção e alocação de aeronaves

Tabela 2.1 - Quadro resumo da revisão de literatura

Referência		Classe		Aplicação		Método de Otimização		Inspeções FH				MCF	MCI	Horizonte Temporal			
Autor	Ano	FS	PM	FA	Militar	Civil	Exato	Estocástico	A	B	C	D		<= S	<= M	<= A	O&S
Sgaslik	1994		X	X	X		X		X	X	X	X					1
Pippin	1998				X		X		X								1
Abrahão	2006		X		X			X		X	X						2
Kozanidis e Skipis	2006		X	X	X		X				X				6		
Papakostas et al	2010		X	X		X			X					S			
Keysan et al	2010		X	X		X	X	X		X				D	2		
Cho e Philip	2011		X	X	X		X			X							1
Basdere e Bilge	2014					X	X	X	X	X	X	X		S			
Kozanidis et al	2014		X	X	X			X			X				6		
Gavranis et al	2015		X	X	X		X			X				D	6		
Guedes	2015				X		X		X	X	X						3
Verhoeff et al	2015				X		X			X							3
Gavranis et al	2017		X	X	X		X	X			X				6		
Marlow e Dell	2017				X		X			X					1		
Safaei e Jardine	2018		X	X		X	X	X	X	X	X	X			8		
Silva e Abrahão	2018		X	X	X		X			X					2		
Peschiera et al	2020		X	X	X			X	X	X	X	X					7
Qin et al	2020		X	X		X	X		X	X	X	X		D			
Witteman et al	2021		X	X		X		X									4
Shahmoradi-Moghadam et al	2021		X	X	X			X					X	D			
Lv et al	2021		X			X		X			X						1
Balakrishnan	2021		X	X	X			X			X						10
Deng et al	2022		X			X		X	X	X	X	X					3
Presente Estudo	2022	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

FS – Dimensionamento da frota com valores médios da Frota.

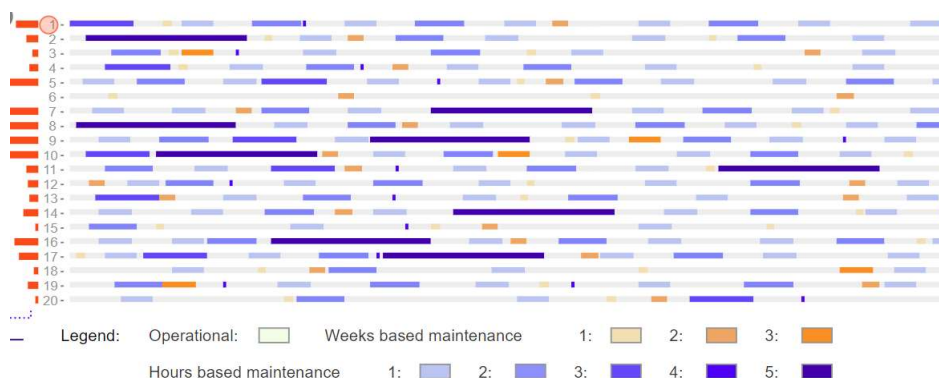
PM – Planejamento da Manutenção. FA – Alocação de aeronaves. MCI - Manutenção Corretiva com valores Individuais.

MCF – Manutenção Corretiva S – Semanal. M – Mensal.

A – Anual. O&S – Fase de operação e suporte. 1 a 10 - quantidade de períodos abordados

Proposta

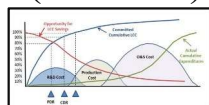
Demanda de Esforço Aéreo												
5%	5%	8%	7%	10%	11%	9%	10%	11%	10%	8%	5%	
378	401	569	507	746	828	668	756	786	711	614	362	7332,00
Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	



Escala de Voo - 2º/8º GAv									
DATA: 02 out 2018.(terça-feira)									
CÓPIAS FISCAIS		E-MAIL							
-JES		-AIS ML							
-Q AVISO HANGAR		-CMT							
-CASA DE FICHA		-ALERTA MED							
-SALA BOMBS		-COPD							
Horario	Cod. Chamada	Pilotos	Medeiros	OE	SR	Codigo OI	Tempo	Área	Obs.
13:00Z	POT1BRANCO	GIA/TUG				60HT005	00:50	TRAF	FAB 8961 2075L+2x00L (PEO LD EL GIA-1P/TUG-IN)
		VIT/VRL				60HT003	00:50		FAB 8959 2075L+2x00L (PMO 1P VIT-1P/VRL-IN)
15:00Z	POT1AZUL	NAT/MRL	SUL/RON			60HT005	00:50	TRAF	FAB 8961 2075L+2x00L (REV PEO LD EL NAT-1P/MRL-IN)
		PAU/FEN	WBR/DRE			60HT033	00:50		FAB 8959 2075L+2x00L (PFO POGA PAU-IN/FEN-AL)
17:30Z	POT1212	BUT/IRI	GOE			01HT009	01:00	TRAF	FAB 8959 2075L+2x00L (REV PFO 1P MAO-1P/IRI-IN)

1. O problema apresenta complexidade combinatória exponencial e sugere a utilização, ora de métodos exatos, ora de procedimentos aproximados.
2. Tendo em vista o que foi apresentado, conclui-se que a modelagem para a solução do problema em tela deva ser feita com o uso combinado de métodos exatos e procedimentos meta-heurísticos, utilizando as vantagens de cada um de acordo com a sua aplicabilidade.

D. O. L. P.
(estimado)



Carac. Mnt da Anv



PMLP

ANO	Est. An. Total	Des. Man. e/ emp/	Des. Man. An.	Planejamento Otimizado				
				Des. Man. An.	Des. Man. An.	Des. Man. An.	Des. Man. An.	Des. Man. An.
1954	592	780	86	86	10	5	4	0
1955	592	770	84	84	10	5	4	0
1956	562	770	80	80	10	5	4	0
1957	556	770	84	80	10	5	4	0
1958	556	770	84	80	10	5	4	0
1959	556	770	84	80	10	5	4	0
1960	575	770	85	80	10	5	4	0
1961	2971	2670	198	518	30	15	12	2
1962	578	770	85	80	10	5	4	0
1963	11379	968	82%	146	73	58	5	

(D.O. M. P. - maior período
com precisão - 1/2 anos)

Média de Esforço Aéreo												
5%	5%	8%	7%	10%	11%	9%	10%	11%	10%	8%	5%	
378	401	569	507	746	828	668	756	786	711	614	362	7332
Jan	Fev	Mar	Abr	Maio	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	

(D.O. C. P. - mensal)

Média de Esforço Aéreo												
5%	5%	8%	7%	10%	11%	9%	10%	11%	10%	8%	5%	
378	401	569	507	746	828	668	756	786	711	614	362	733
Jan	Fev	Mar	Abr	Maio	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	

Escala diária/semanal

[illegible]

Metodologia

1ª Etapa – Programação Linear Inteira Binária

$$\text{minimize } \sum_{a=1}^A \sum_{h=0}^H x_{ah} d_{ah} \quad (3.1) \quad \bullet \text{ minimizar o } \textit{downtime} \text{ total da frota}$$

$$\sum_{a=1}^A \sum_{h=0}^H x_{ah} h_a \geq FHR \quad (3.2) \quad \bullet \text{ assegura que a frota irá voar pelo menos a quantidade total de horas previstas para o período de O\&S.}$$

$$\sum_{a=1}^A \sum_{h=0}^H x_{ah} d_{ah} \leq TW - \sum_{w=1}^W I_w \quad (3.3) \quad \bullet \text{ não pode exceder a capacidade das oficinas}$$

$$\sum_{h=0}^H x_{ah} = 1, \quad \forall a \in [1, A] \quad (3.4) \quad \bullet \text{ um único valor de horas de voo totais a serem voadas, de } \textit{downtime} \text{ acumulado}$$

$$\sum_{h=0}^H x_{ah} h_a \leq H, \quad \forall a \in [1, A] \quad (3.5) \quad \bullet \text{ não poderá ultrapassar seu limite de vida}$$

$$x_{ah} \in [0, 1] \quad (3.6) \quad \bullet \text{ A variável binária } X_{ah} \text{ indica que a quantidade de horas de voo } h \text{ será atribuída à aeronave } a.$$

2ª Etapa - Metaheurística

$$\text{minimizar } \sum_{j=1}^J \sum_{l=1}^L X h_{jl}$$

(3.8) • minimizar o esforço aéreo previsto e não voado

Sujeito a:

$$\sum_{j=1}^n X_{ijk} = 1, \quad \forall i \in [1, n], \forall k \in [1, m] \quad (3.9) \bullet \text{ cada inspeção poderá ser alocada somente uma vez.}$$

$$\sum_{i=1}^n X_{ijk} = 1, \quad \forall j \in [1, n], \forall k \in [1, m] \quad (3.10) \bullet \text{ apenas uma inspeção pode ser executada por dia em cada oficina.}$$

$$h_{jk} + \sum_{i=1}^n p_{ik} X_{ijk} \leq h_{j+1,k}, \quad \forall j \in [1, n-1], \forall k \in [1, m] \quad (3.11) \bullet \text{ correto sequenciamento das inspeções, onde o início da inspeção no dia } j+1 \text{ é maior ou igual dia de início da inspeção anterior } j \text{ mais o tempo de execução da inspeção } i \text{ iniciada no dia } j.$$

2ª Etapa - Metaheurística

$$\sum_{k=1}^m r_{i,l+1,k} s_{ik} \geq \sum_{k=1}^m r_{i,l,k} (s_{ik} + p_{ik}), \forall i$$

$$\in [1, n], \forall l \in [1, m-1]$$

$$M \left(1 - \sum_{k=1}^m r_{i,l,k} x_{ijk} \right)$$

$$\geq \sum_{k=1}^m r_{i,l,k} (s_{ik} + h_{jk}), \forall i, j \in [1, n], \forall l \in [1, m]$$

$$M \left(1 - \sum_{k=1}^m r_{i,l,k} x_{ijk} \right)$$

$$\geq \sum_{k=1}^m r_{i,l,k} (h_{jk} - s_{ik}), \forall i, j \in [1, n], \forall l$$

$$\in [1, m]$$

$$h_{nk} + \sum_{i=1}^n p_{i,k} X_{ink} \leq Cmax,$$

$$\forall k \in [1, m]$$

$$h_{jk} \geq 0, \quad \forall j \in [1, n], \forall k \in [1, m]$$

$$s_{ik} \geq 0, \quad \forall i \in [1, n], \forall k \in [1, m]$$

$$X_{ijk} \in \{0,1\}, \quad \forall i, j \in [1, n], \forall k \in [1, m]$$

- (3.12) • O início da manutenção só pode acontecer ao fim da operação anterior

- (3.13) • indicam que para cada inspeção i e aeronave l , deve haver uma posição j estabelecida na estação de trabalho k que corresponda a essa operação.

- (3.14) • O instante inicial h dessa posição deve ser igual ao instante inicial s da inspeção i na mesma estação de trabalho, ou seja, $X_{ijk} = 1 \rightarrow h_{jk} = s_{ik}$. A

- (3.15) • término da última posição de cada estação de trabalho.

(3.16)

- (3.17) • variáveis não-negativas e binárias.

(3.18)

2ª Etapa - Metaheurística

Aircraft	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Total FH
ACFT1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	3	3	9.5
ACFT2	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	3	3	11
ACFT3	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	1	1	1	1	1	1	4	4	6
ACFT4	3	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	5	5	16.5
ACFT5	4	4	4	4	4	4	4	5	5	5	5	5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	5	5	11.5
Total																					54.5

Figura 3.1 - Exemplo de solução inicial do programa de manutenção preventiva e hora de voo diária esperada necessária

Aircraft	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Total FH
ACFT1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	3	3	4.5
ACFT2	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	3	3	8
ACFT3	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	1	1	1	1	1	1	4	4	6
ACFT4	3	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	5	5	13.5
ACFT5	4	4	4	4	4	4	4	5	5	5	5	5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	5	5	4.5
Total																					36.5

Figura 3.2 - Exemplo do programa de manutenção preventiva otimizado e das horas de voo diárias previstas necessárias

SIMULAÇÃO

Distribuição media de esforço aéreo ao longo do ano													
Média	5%	5%	8%	7%	10%	11%	9%	10%	11%	10%	8%	5%	950
	49	51	73	65	97	107	87	97	101	91	79	46	
	Jan	Fev	Mar	Abr	Maio	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	

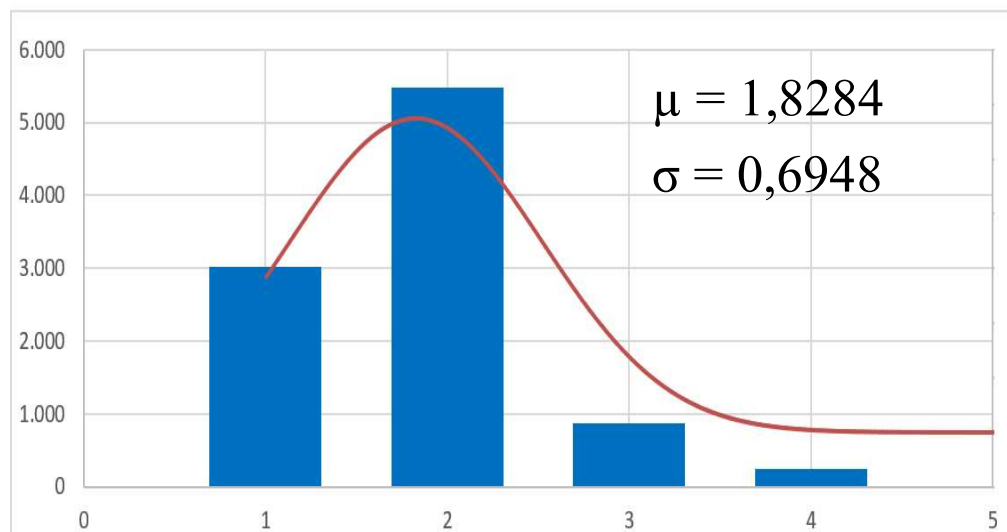


Figura 4.1 – Distribuição de probabilidade de quantidade de aeronaves por missão

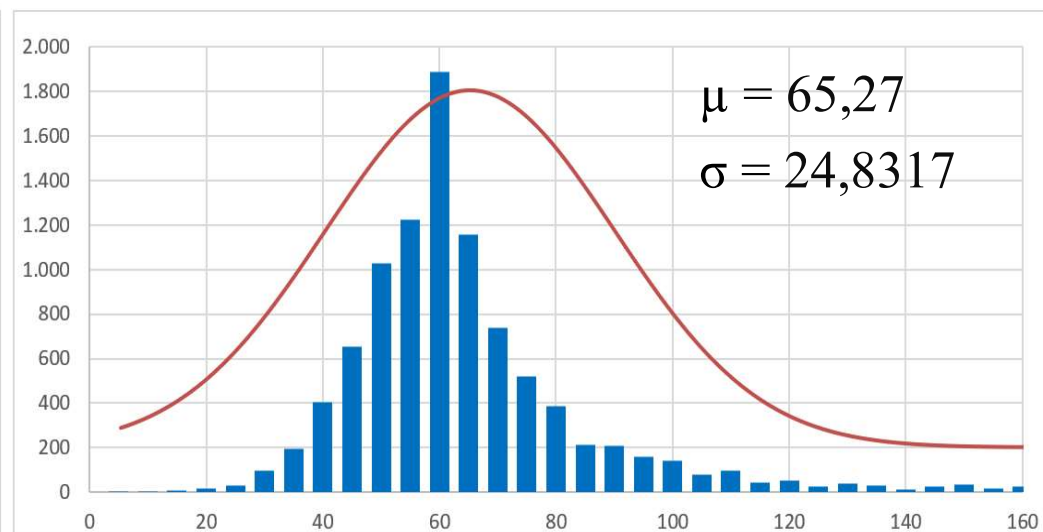


Figura 4.2 - Distribuição de probabilidade de duração da missão

Contexto de Aplicação

FROTA 1

- 12 Helicópteros
- 15 anos de operação
- 4.000 h de célula
- 950 h anuais / 14.250 h totais (Padrão)
- TAT: 1 Hora
- 21.000 h / 28.000 h / 35.000 h
- MTTR/MTBUMA médio e individual

Plano de Manutenção	
Ciclo (h)	<i>Downtime</i> (Dias)
50	21
100	28
200	105
1000	180



Aeronave	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Média
MTTR (Dias)	9,11	3,71	4,42	5,80	5,18	8,28	5,26	4,21	5,53	7,57	3,06	4,47	5,3
MTBUMA(FH)	5:37	7:24	10:19	12:34	10:25	14:40	20:01	17:44	11:51	30:48	20:37	37:25	13:52

Tabela 4.3 - Parâmetros individuais de manutenção corretiva

1ª Etapa

14250FH - 15 anos

Downtime					Disponibilidade Média			
Frota	Convencional	Proposto	Ganho	Ganho (%)	Frota	Convencional	Proposto	Ganho
12 Anv	12.240	11.495	745	6,09	12	81,37%	82,50%	1,13 pp

Tabela 4.4 - Resumo dos resultados do planejamento de longo prazo da manutenção

Planejamento Otimizado									Planejamento Convencional							
ANV	EA	Dt	EA p/ano	A _o	INSP 50FH	INSP 100FH	INSP 200FH	INSP 1000FH	EA	Dt	EA p/ano	A _o	INSP 50FH	INSP 100FH	INSP 200FH	INSP 1000FH
1	50	440	3	92%	0	0	0	0	1188	3040	79	44%	12	6	4	1
2	200	532	13	90%	2	1	0	0	1188	1785	79	67%	12	6	4	1
3	200	516	13	91%	2	1	0	0	1188	1693	79	69%	12	6	4	1
4	200	523	13	90%	2	1	0	0	1188	1734	79	68%	12	6	4	1
5	200	532	13	90%	2	1	0	0	1188	1787	79	67%	12	6	4	1
6	200	543	13	90%	2	1	0	0	1188	1849	79	66%	12	6	4	1
7	2200	2548	147	53%	22	11	8	2	1188	1503	79	73%	12	6	4	1
8	2600	2937	173	46%	26	13	10	2	1188	1473	79	73%	12	6	4	1
9	200	524	13	90%	2	1	0	0	1188	1739	79	68%	12	6	4	1
10	2200	2511	147	54%	22	11	8	2	1188	1483	79	73%	12	6	4	1
11	3000	3113	200	43%	30	15	12	2	1188	1370	79	75%	12	6	4	1
12	3000	3030	200	45%	30	15	12	2	1188	1338	79	76%	12	6	4	1
	14250	17747	950	73%	142	71	50	10	14250	20793	950	68%	144	72	48	12

Tabela 7: Parâmetros de manutenção preventiva e corretiva individual

Tabela 8: Parâmetros de manutenção preventiva e corretiva individual.

1ª Etapa

14250FH - 15 anos

<i>Downtime</i>					Disponibilidade Média			
Frota	Convencional	Proposto	Ganho	Ganho (%)	Frota	Convencional	Proposto	Ganho
12 Anv	20.793	17.747	3.046	14,65%	12	68,35%	72,99%	4,64 pp

Tabela 10: Resumo dos resultados do planejamento de longo prazo incluindo manutenção preventiva e corretiva individual

FHR	Manutenção Preventiva Completa		Manutenção Completa com valores médios da frota		Manutenção Completa com valores individuais da frota	
FHR	Redução D.	Aumento Ao.	Redução D.	Aumento Ao.	Redução D.	Aumento Ao.
7100	4.88%	0.80%	3.72%	0.83%	16.92%	3.84%
14250	0.05%	0.01%	0.04%	0.02%	14.65%	6.35%
21000	4.42%	1.96%	3.17%	2,37%	15.57%	11.67%
28000	1.32%	0.83%	0.93%	1.12%	CONVENCIONAL INVIÁVEL	
35000	1.26%	1.16%	0.89%	1.89%	CONVENCIONAL INVIÁVEL	
42000	2.36%	3.26%	1.12%	5.28%	AMBOS INVIÁVEIS	
Média	2.67%	0.90%	1.97%	1.09%	15.71%	7.29%

Tabela 11: Comparação entre o modelo de planejamento convencional e o modelo de planejamento proposto para cada contexto operacional

2ª Etapa

Aeronaves

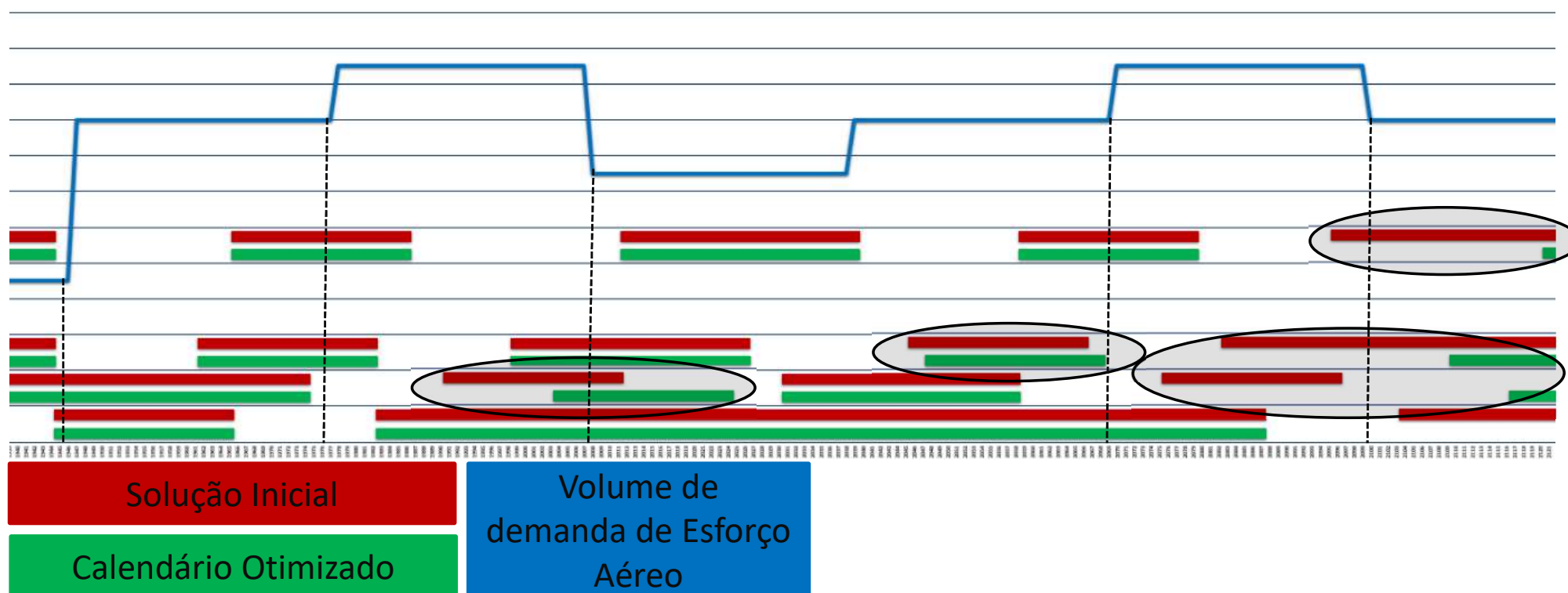


Figura 10: Comparação entre a solução inicial e o calendário de manutenção preventiva otimizado

2ª Etapa Oficinas

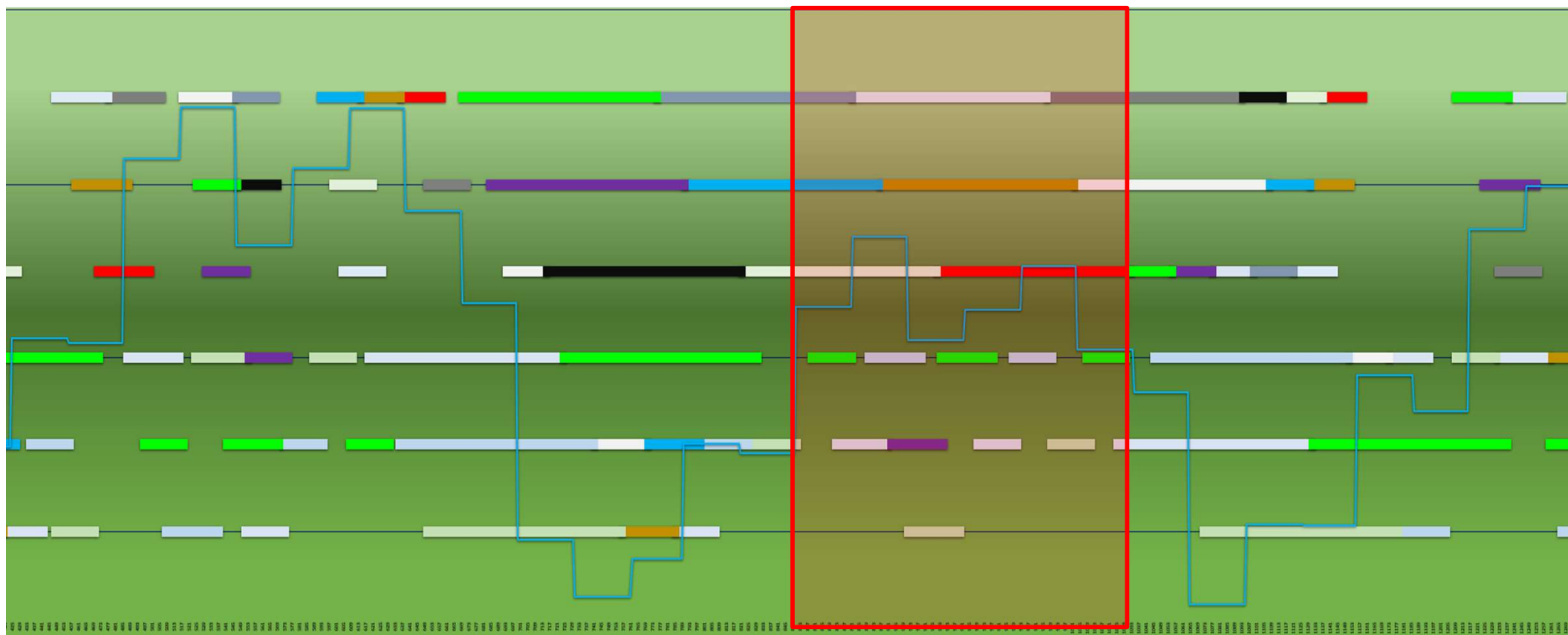


Figura 12: Planejamento Convencional da Manutenção X Otimizado - Dia 435 a 1277

2ª Etapa Oficinas

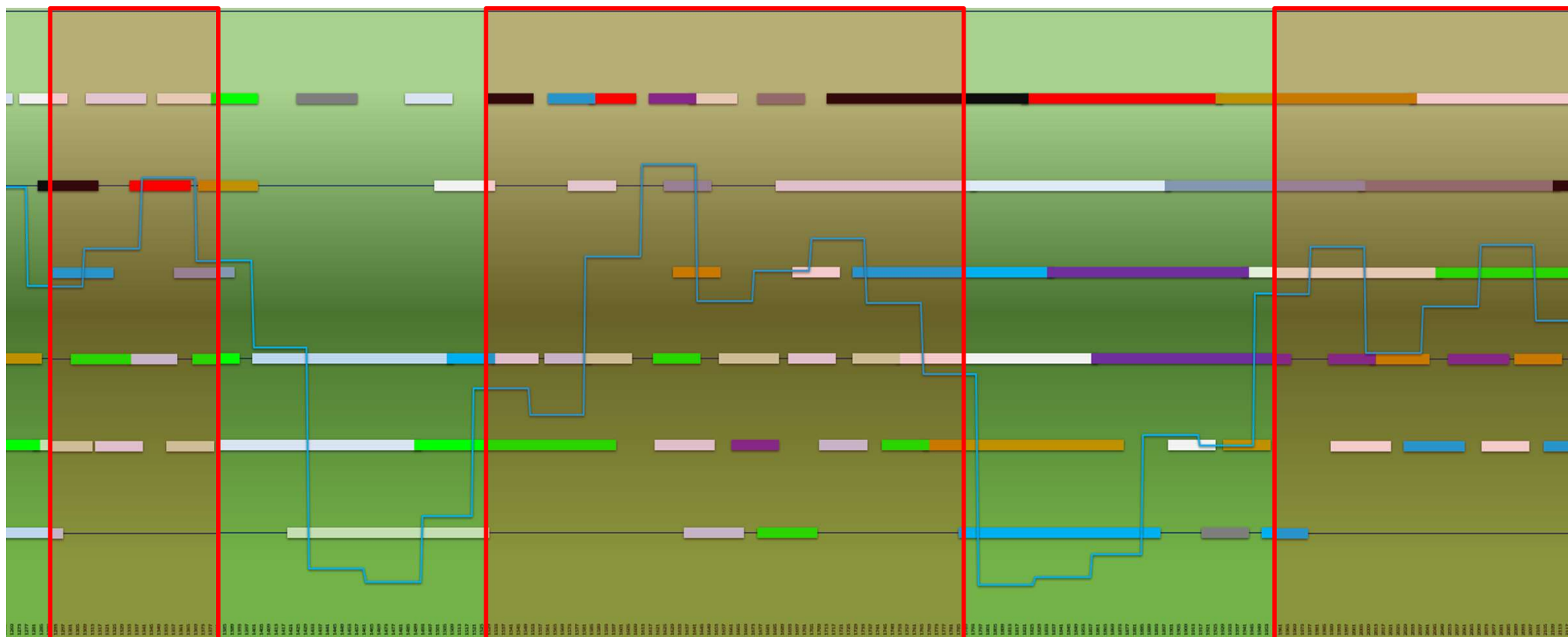


Figura 13: Planejamento Convencional da Manutenção X Otimizado - Dia 1278 a 2121

2ª Etapa

Desempenho do Algoritmo

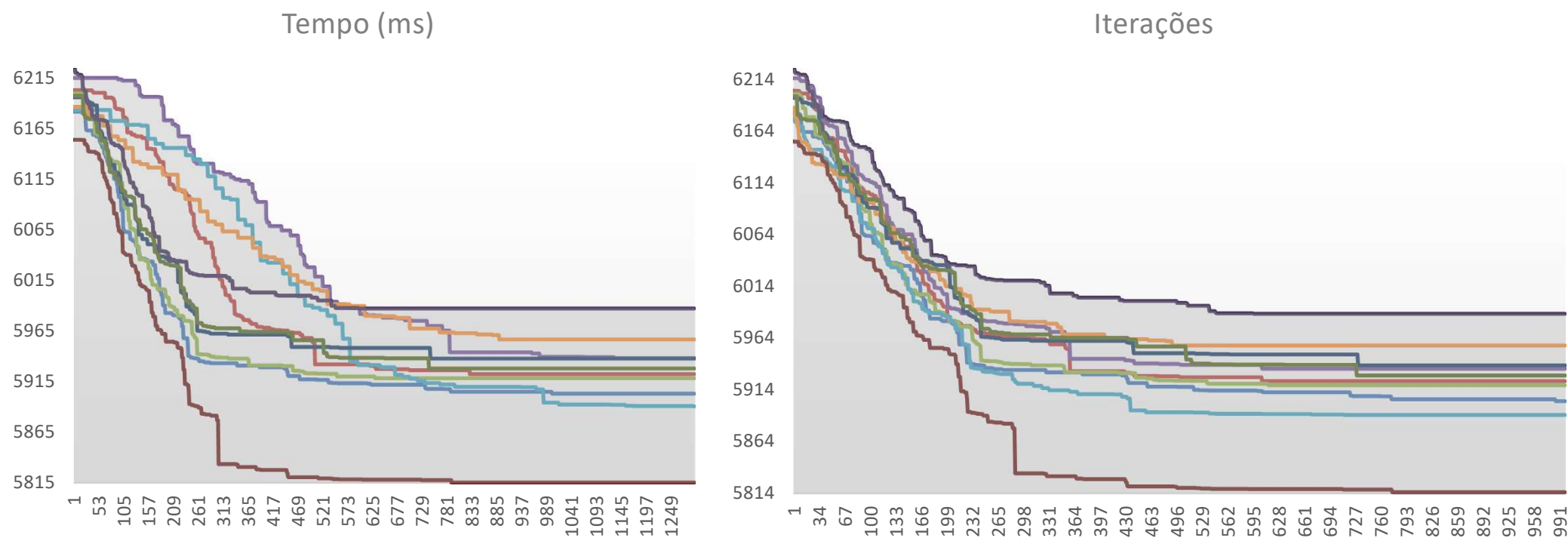


Figura 18 e 19 : Otimização da solução em relação ao tempo de processamento, em milissegundos, e a quantidade de iterações

Simulação

Disponibilidade (A_o)

Max 1ª Etapa: 82,5% / 81,37%

Max Sim: 74,4% / 68,8%

p -value: $1,319 \times 10^{-50}$

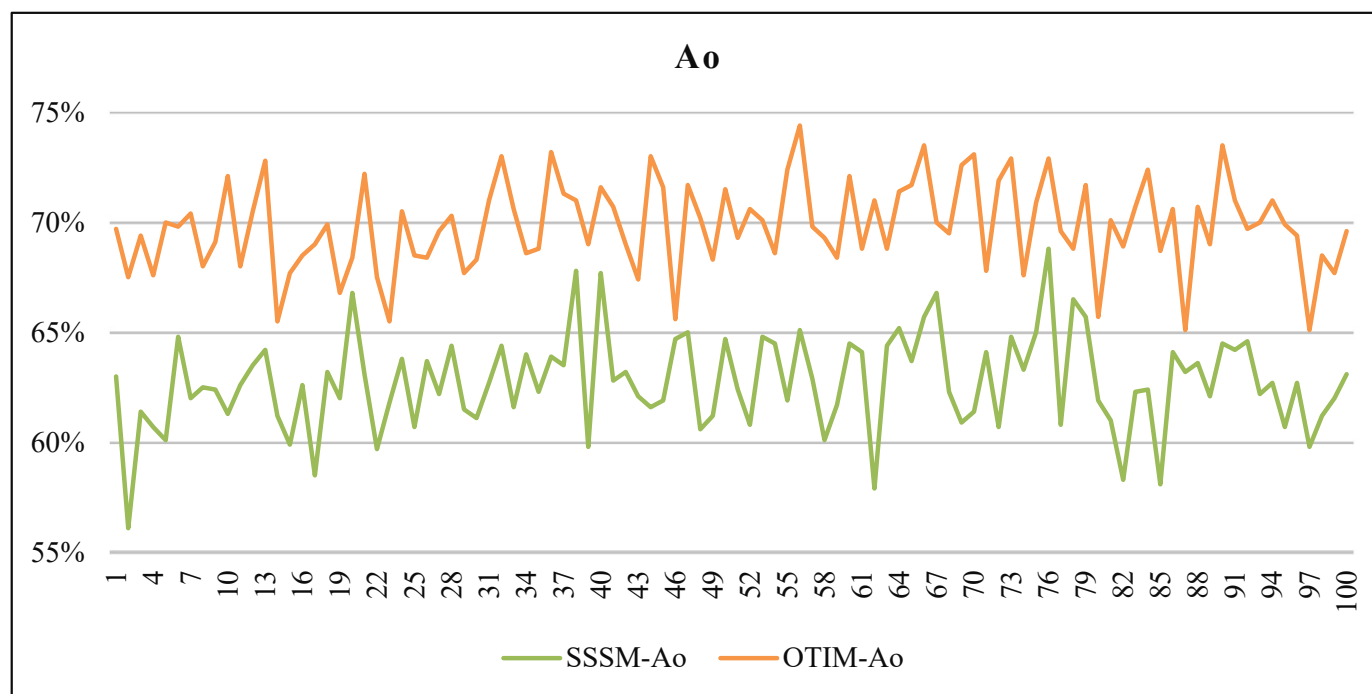


Figura 4.14 - Comparação da disponibilidade entre o SSSM e o modelo novo

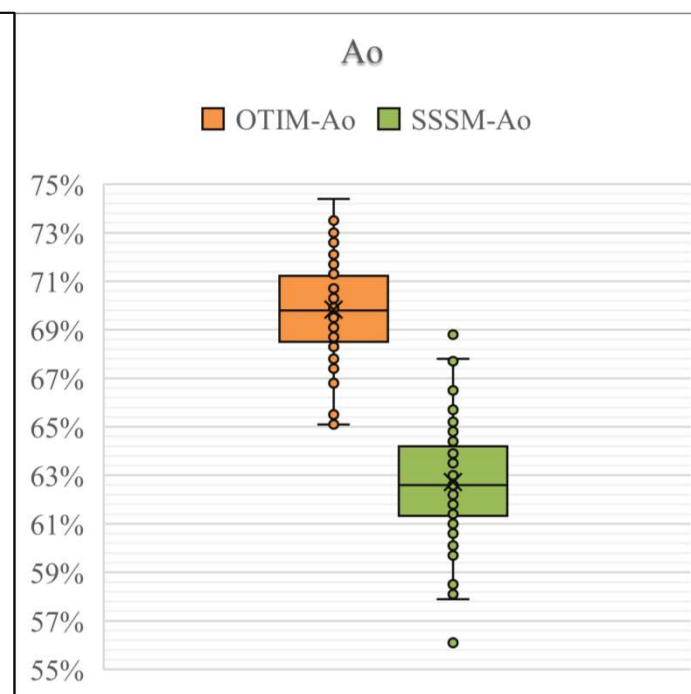


Figura 4.16: Boxplot para comparação de disponibilidade entre SSSM e o modelo novo

Simulação

Confiabilidade da Programação (SR)

$p\text{-value: } 8,27 \times 10^{-61}$

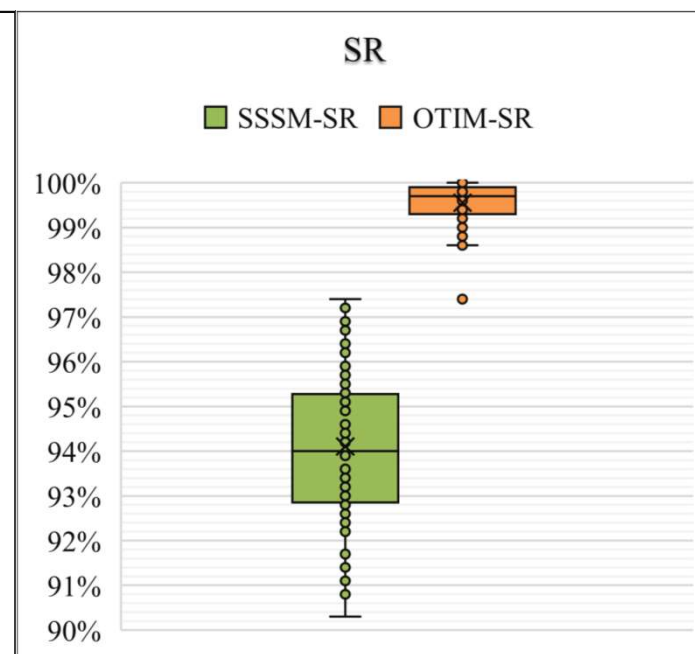
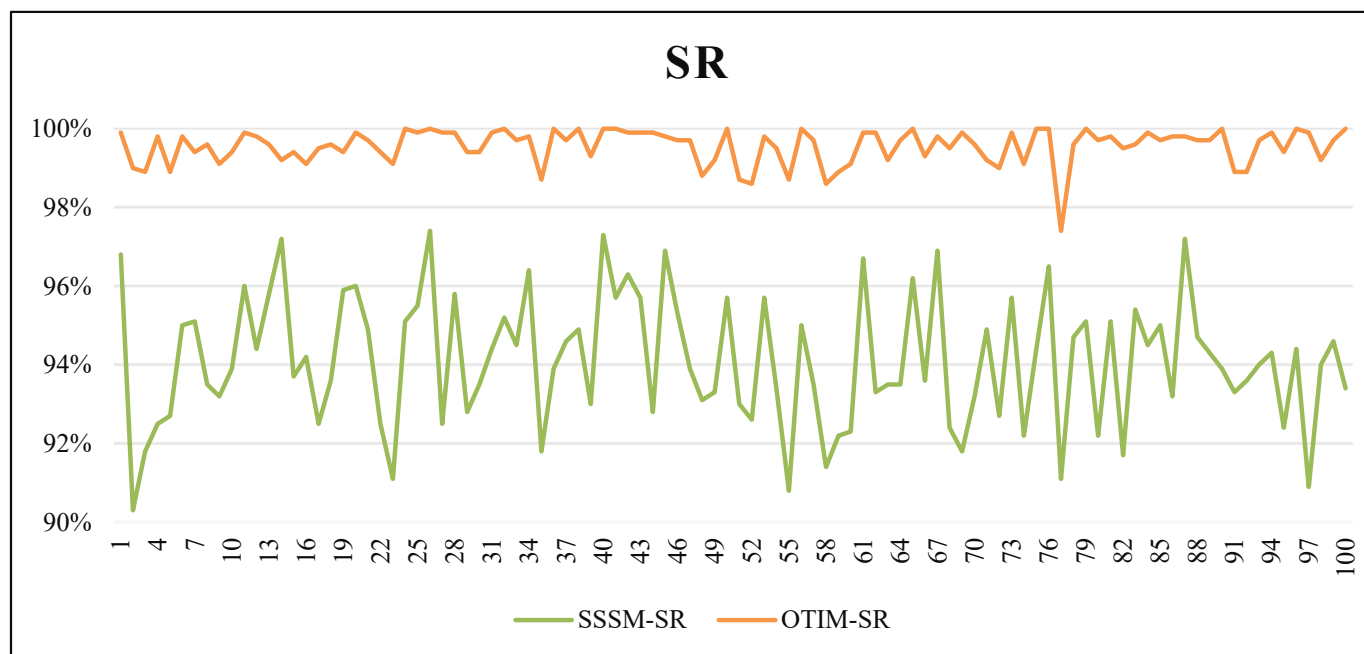


Figura 4.15 - Comparação da Confiabilidade da Programação entre o SSSM e o modelo novo

Figura 4.16 - Boxplot para comparação de Confiabilidade da Programação entre SSSM e o modelo novo

99,55% X 94,10%

97,5% - (AUSTRALIAN NATIONAL AUDIT OFFICE, 2014)

Simulação

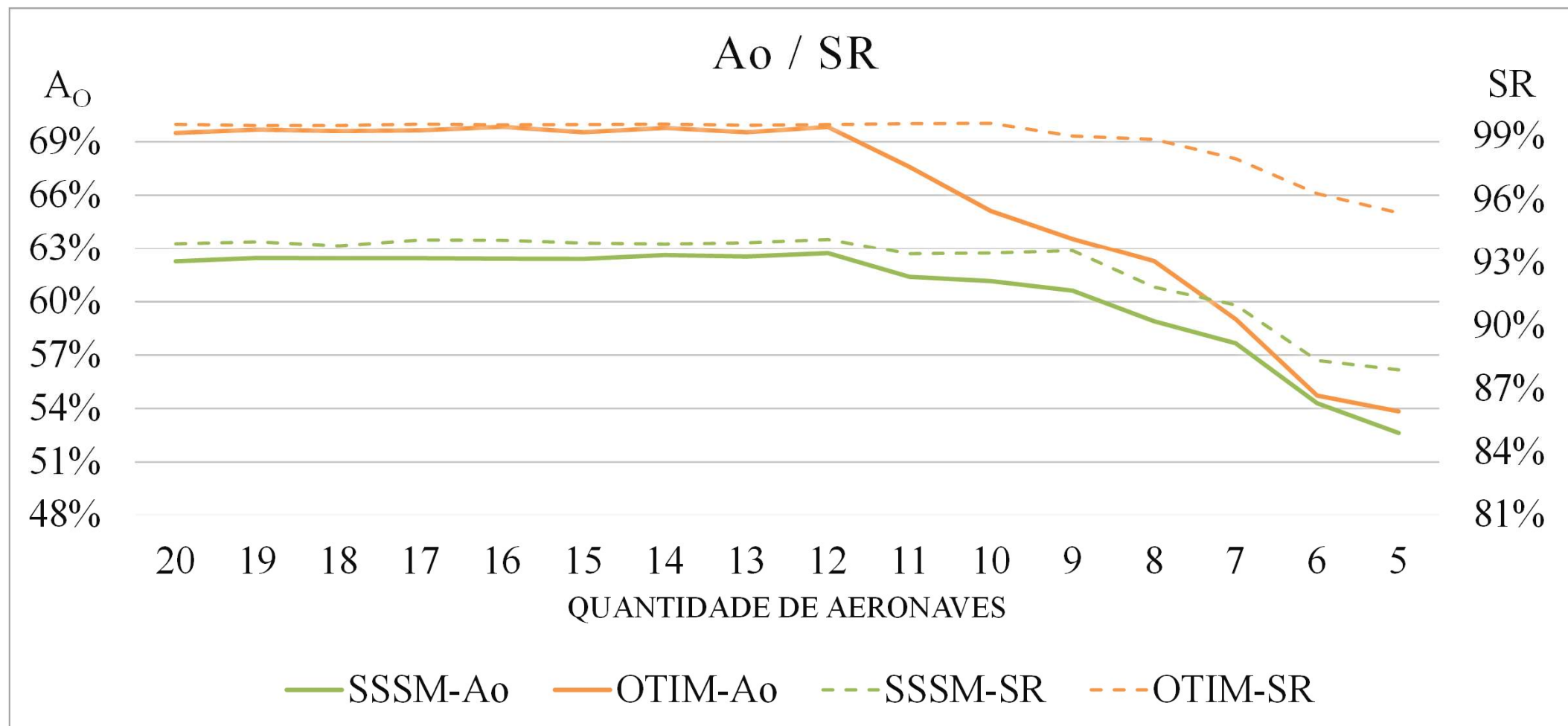
Impacto das filas

Cenário			Em Fila (Dias)		Total de Indisponibilidade		Red de Filas	% da Fila na Indisponibilidade	
Manutenção	FHR	Oficinas	SSSM	OTIM	SSSM	OTIM		SSSM	OTIM
Prev	14.250	Irrestrito	-	-	12.921,95	12.634,01	0,00%	0,0%	0,0%
Prev	14.250	3	11.943,03	7.702,65	23.930,40	19.952,15	35,51%	49,9%	38,6%
Prev + Corr Frota	14.250	3	11.723,21	6.765,39	28.557,37	25.727,28	42,29%	41,1%	26,3%
Prev + Corr Ind	14.250	3	11.302,78	5.685,81	28.982,99	23.118,63	49,70%	39,0%	24,6%
Prev	21.000	4	11.799,53	10.553,52	29.186,05	28.101,87	10,56%	40,4%	37,6%
Prev + Corr Frota	21.000	6	6.446,43	3.801,78	31.400,09	29.479,15	41,03%	20,5%	12,9%
Prev + Corr Ind	21.000	6	6.797,84	3.664,53	32.447,46	29.276,32	46,09%	21,0%	12,5%
Prev	28.000	5	10.811,87	9.637,52	33.577,48	32.968,88	10,86%	32,2%	29,2%
Prev + Corr Frota	28.000	8	2.945,46	2.041,57	36.312,41	35.639,01	30,69%	8,1%	5,7%
Prev + Corr Ind	28.000	8	1.126,20	619,41	35.837,86	34.218,41	45,00%	3,1%	1,8%
Prev	35.000	8	2.038,95	1.343,62	32.467,78	32.015,64	34,10%	6,3%	4,2%
Prev + Corr Frota	35.000	9	1.765,47	1.441,78	41.788,76	41.216,88	18,33%	4,2%	3,5%

Tabela 17: Redução de filas de manutenção para os diferentes cenários (frota de helicópteros)

Simulação

Dimensionamento da Frota



Figuras 4.17 e 4.18 – A_o e SR das frotas com diferentes dimensões.

Discussão Final

1. Contribuiu para a melhoria do processo de planejamento e tomada de decisão – visão sistêmica da frota;
2. Referências e diretrizes para planejamentos de níveis inferiores;
3. Análise de dimensionamento da frota, distribuição da frota e do esforço aéreo;
4. Pode ser adaptado para apresentar demais custos logísticos relacionados à manutenção preventiva (recursos humanos e materiais);e
5. Dificuldade em relação às incertezas – níveis de planejamento x horizonte temporal x precisão da previsão de demanda

Conclusão

1. Problema do planejamento da manutenção e uso de aeronaves;
2. Literatura restrita à manutenção preventiva no curto e médio prazo. Considera características homogêneas de manutenção;
3. Desenvolvido modelo considerando a manutenção corretiva e características individuais ao longo de toda a fase de operação e suporte. Impacto relevante.
4. Duas etapas de otimização, sendo a primeira um método exato (PLIB) e a segunda uma metaheurística (LNS), para o planejamento de longo e médio/curto prazo, respectivamente
5. Simulação demonstrou a melhoria dos indicadores de A_0 e SR, o impacto das filas e possibilidades no dimensionamento da frota

Trabalhos Futuros

1. O uso de outros métodos de otimização, exatos ou não exatos podem melhorar tanto o desempenho computacional quanto o resultado;
2. Inserir aspectos da manutenção calendária, de estocagem, de inclusão e perda de aeronaves e frotas usadas. Fidelidade;
3. Incluir os custos financeiros, demanda de recursos humanos, material de suprimento e apoio de solo, (demais elementos do SLI). Precisão; e
4. Incluir a otimização na própria simulação (modelo dinâmico).

“Podemos andar devagar,
mas nunca para trás”

Abraham Lincoln



Dúvidas



Introdução

Fundamentação
Teórica

Metodologia

Resultados e
Discussão

Conclusão