



# 2º Simpósio Internacional de Confiabilidade e Gestão de Segurança Operacional

09 a 11 de novembro de 2010



**Organização Brasileira  
para o Desenvolvimento  
da Certificação Aeronáutica**



**Organização Brasileira  
para o Desenvolvimento  
da Certificação Aeronáutica**

# II Simpósio de Confiabilidade e Gestão da Segurança Operacional





# Modelamento da Despachabilidade de uma Frota de Aeronaves Comerciais

*Jaures Cardoso Jr.*





O cenário operativo de uma frota de aeronaves comerciais demanda o transporte de passageiros de forma segura, rápida, confortável e econômica. Para tanto, as companhias aéreas estabelecem índices de qualidades específicos visando à garantia continuada da satisfação do cliente, bem como, a otimização dos tempos operacionais da frota e o cumprimento de cláusulas contratuais.

Um desses índices, exigido e controlado pelas companhias aéreas, é a Despachabilidade (*Schedule Reliability – SR*), importante indicador da qualidade operacional de uma frota de aeronaves comerciais, que traduz o cumprimento do horário do voo identificado no bilhete.

Com o objetivo de responder às drásticas e rápidas mudanças na demanda e expectativas do cliente comprometido em atender às exigências do ambiente de atuação, a utilização dos modelos matemáticos em situações complexas e de alta integração tem sido cada vez mais empregada para auxiliar o processo de tomada de decisão em diversas áreas de trabalho, tais como ensino, pesquisa, logística, produção, desenvolvimento, manutenção e outras.

O presente trabalho aborda esse cenário operativo através um modelamento estatístico que consiste na aplicação dos Diagramas de Blocos de Confiabilidade, na fase de desenvolvimento da aeronave, para a determinação analítica da Disponibilidade Pontual visando caracterizar a Despachabilidade da frota de aeronaves. Além disso, identifica as variáveis relacionadas ao processo, envolvendo tanto o fabricante como o operador, bem como, o grau de dependência e possíveis otimizações, visando assegurar o atendimento às metas estabelecidas.

Os resultados obtidos com a aplicação desse modelo matemático foram significativos em termos da caracterização da Disponibilidade Pontual como estimativa da Despachabilidade da frota e também na aplicação da experiência adquirida neste estudo em novos projetos de desenvolvimento de produtos aeronáuticos



## Objetivo



*Caracterizar o cenário operativo de uma frota de aeronaves, aplicando a Confiabilidade no ciclo de vida da aeronave – do projeto à operação – na determinação analítica da Despachabilidade através de um modelamento estatístico.*



# Agenda



## Considerações Iniciais

- Cenário operativo de uma frota de aeronaves comerciais
- Definições Básicas
- Reliability Block Diagram – RBD
- Atividades de Confiabilidade no ciclo de vida de aeronave

## Plano de Trabalho

- Ferramenta de Análise
- Caracterização da Despachabilidade
- Processo do Modelamento

## Desenvolvimento

- Despachabilidade x Disponibilidade
- Modelo de 1 voo
- Modelo de 2 voos consecutivos
- Simulação de Monte Carlo para “n” voos consecutivos
- Validação do modelamento usando um sistema-piloto (hidráulico)
- Resultados

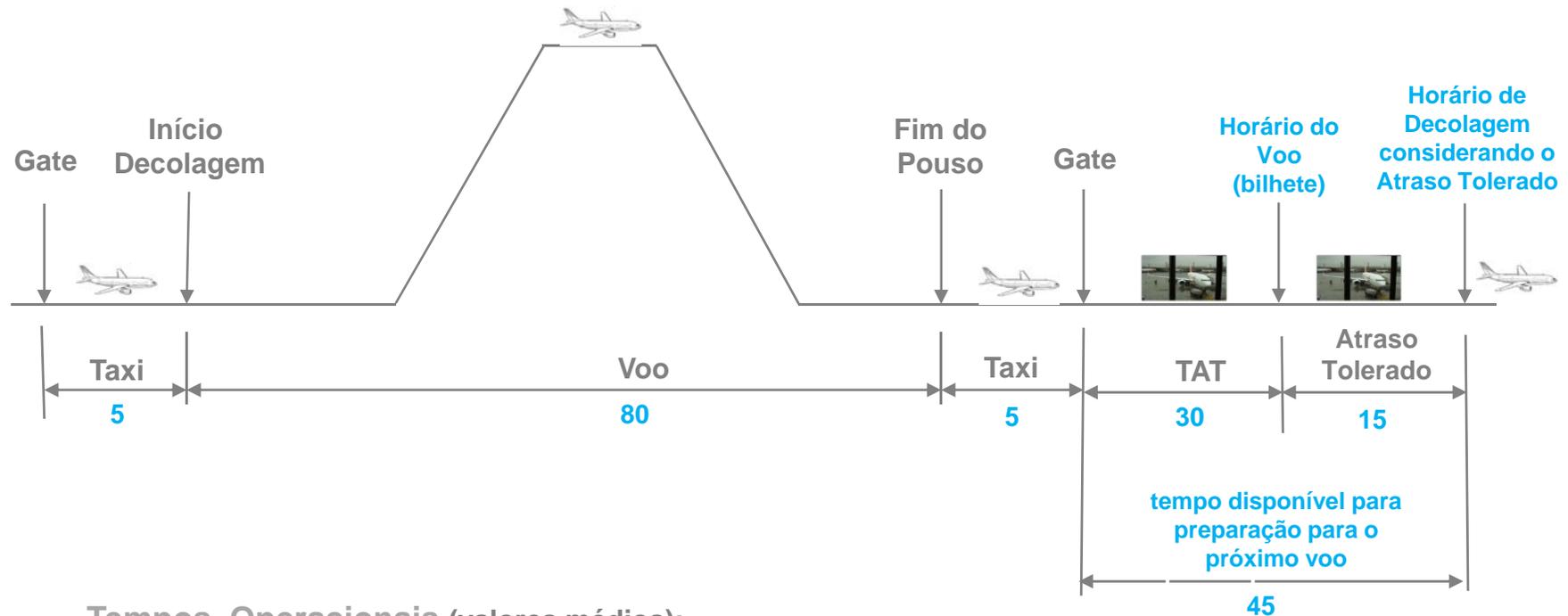
## Conclusão e Considerações Finais



# Cenário Operativo



Tempística das decolagens e pousos – aviação comercial



Tempos Operacionais (valores médios):

- Taxi ..... 5 minutos
- Voo ..... 80 minutos
- TAT (turn around time) ..... 30 minutos
- Atraso Tolerado ..... 15 minutos

Total ..... 135 minutos = 2h:15' = 2,25 horas



# Definições Básicas



**CONFIABILIDADE** (reliability) é a capacidade de um sistema / item desempenhar uma dada função sem falha, sob condições específicas e durante um período de tempo especificado.

**MANTENABILIDADE** (maintenability) é a capacidade de um sistema / item ser mantido ou recolocado em condições de executar suas funções requeridas sob condições de uso especificadas, quando a manutenção é executada sob condições determinadas e mediante procedimentos e meios prescritos.

**DISPONIBILIDADE** (availability) é a capacidade de um sistema / item estar em condições de executar uma certa função, durante um período de tempo especificado, levando-se em conta os aspectos combinados de sua confiabilidade e manutenibilidade.

**MTBF** (mean time between failures) é a figura de desempenho operacional de um item, caracterizada pela média dos tempos entre falhas do item. (itens reparáveis)

**MTBUR** (mean time between unscheduled removals) é a figura de desempenho operacional de um item, calculada pela razão do total de horas voadas pelo item, acumuladas em um dado período, pelo número de remoções não programadas do item que ocorreram durante o mesmo período.

**DESPACHABILIDADE** (SR - schedule reliability) é a figura de desempenho operacional de uma aeronave dada pela porcentagem de voos programados (*SF*) sem a ocorrência de interrupções operacionais.

Interrupções operacionais:

- atraso superior a 15 minutos
- retorno da pista
- retorno de voo
- voo para alternativa
- cancelamento

$$SR(\%) = \frac{SF - Interruptions}{SF} 100$$

SF (scheduled flight) ... voo programado e listado na tabela de horários de partida.



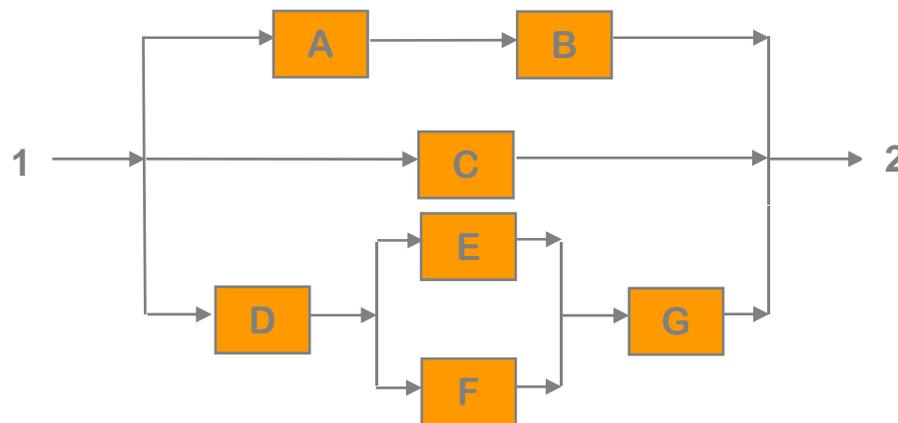
# Reliability Block Diagram



O RBD – Reliability Block Diagram – é uma ferramenta gráfico-analítica para determinação da probabilidade de sucesso de um sistema, a partir da contribuição dos elementos (blocos de confiabilidade) que compõem esse sistema.

O resultado é uma estimativa. A comparação está sendo feita com valores pontuais.

O RBD do sistema em estudo depende da arquitetura de implementação dos blocos, bem como, das confiabilidades individuais dos elementos e do tempo de operação dos componentes.

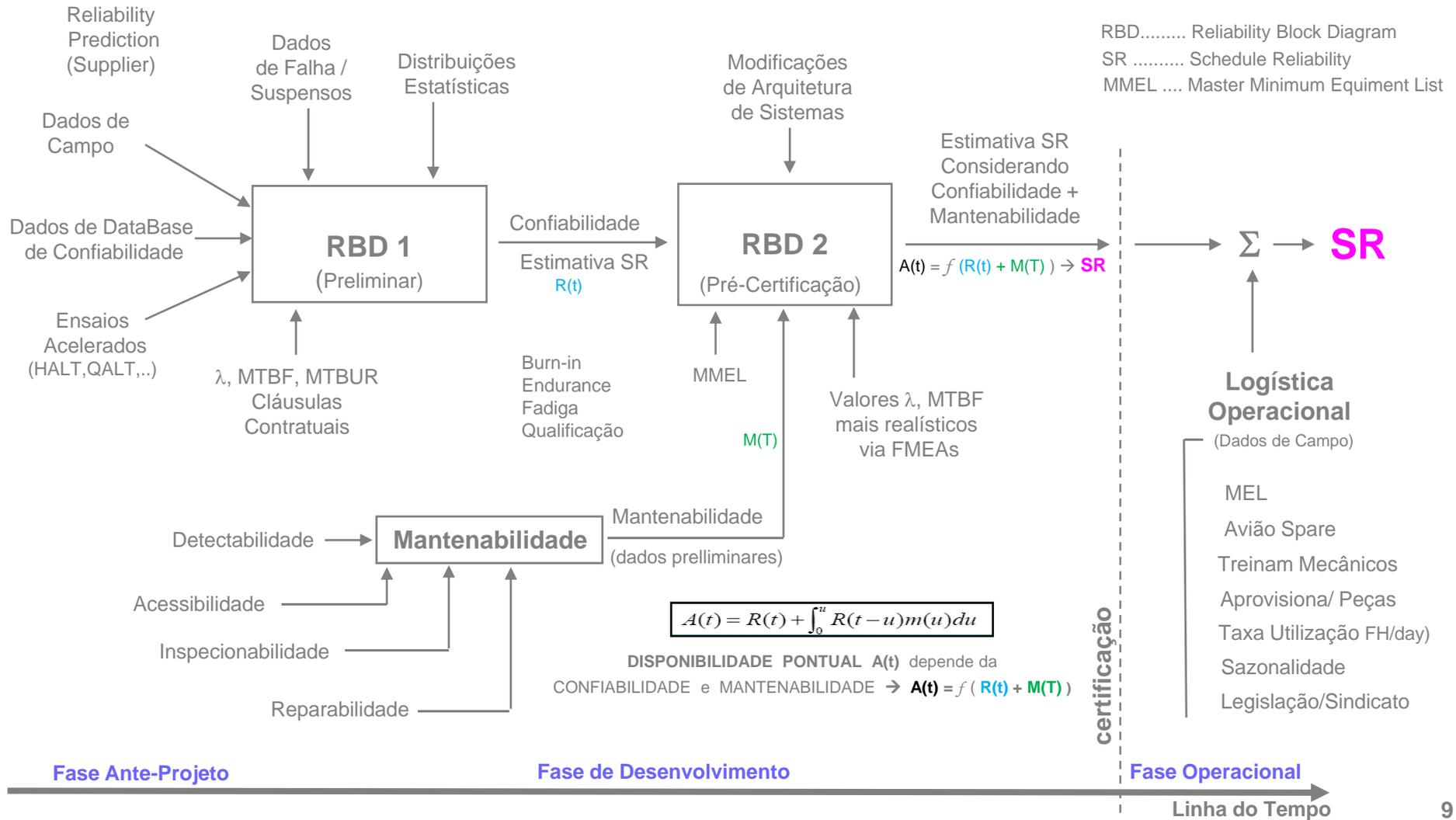


$$R_{\text{SISTEMA 1-2}} = ?$$

$$R_{\text{sistema1-2}} = (A \text{ e } B) \text{ ou } C \text{ ou } [D \text{ e } (E \text{ ou } F) \text{ e } G]$$

$$= RA.RB // RC // [RD.(RE // RF).RG]$$

$$\dots \text{ sendo } RE // RF = 1 - (1-RE)(1-RF)$$



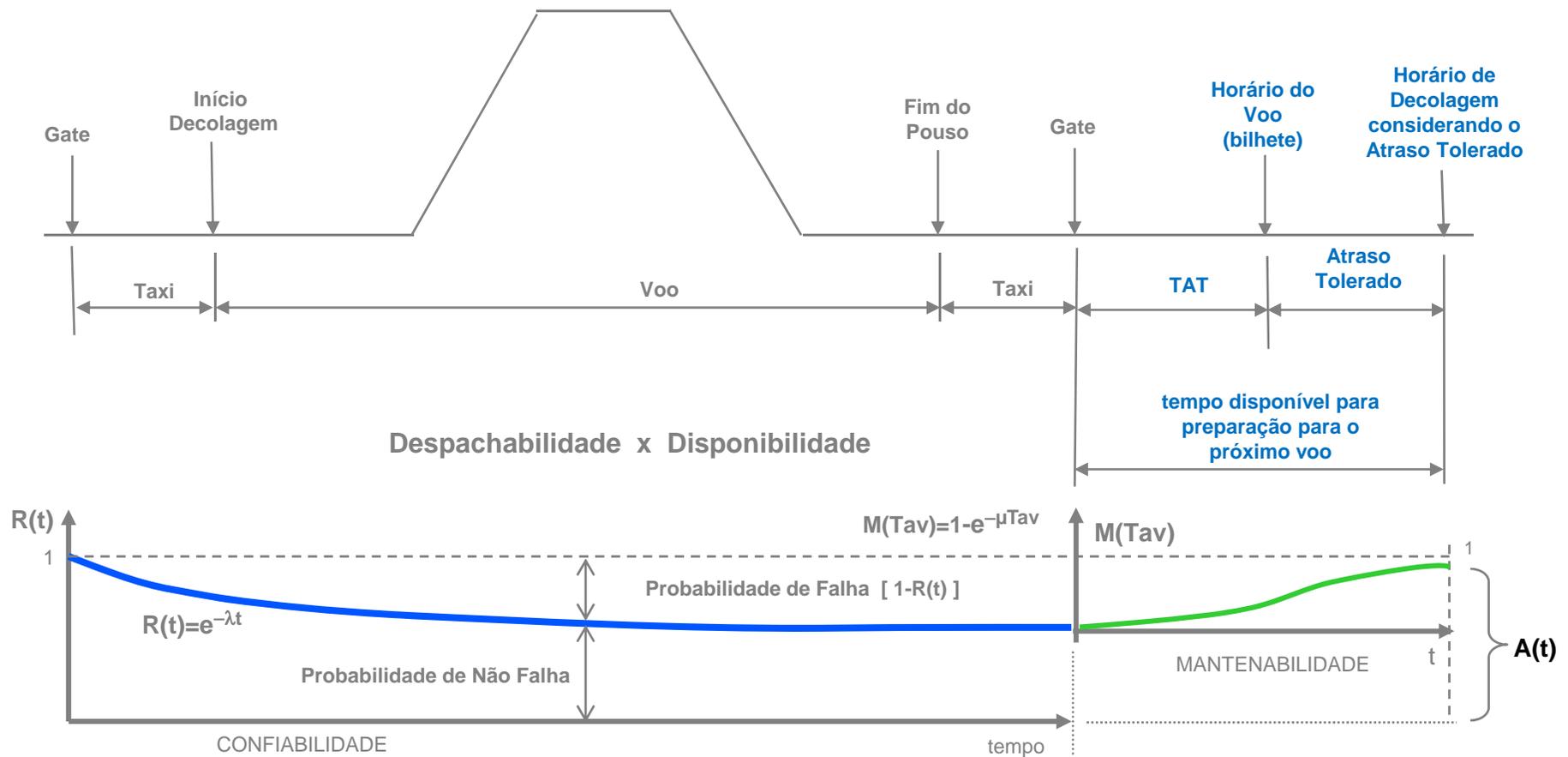




- **Ferramentas de Análise**
  - Construção dos RBDs
  - Análise dos dados baseado na distribuição de Weibull
  - Estatística Aplicada: Estimadores e Simulação Monte Carlo
  
- **Caracterização da Despachabilidade**
  - Caracterização do cenário operativo
  - Definição da melhor métrica de confiabilidade para esse cenário operativo
  - Validação dessa métrica utilizando recursos das ferramentas da ReliaSoft
  
- **Processo do Modelamento**
  - Caracterização do SR utilizando a figura de Confiabilidade “Disponibilidade Pontual”
  - Modelo de 1 voo
  - Modelo de 2 voos consecutivos
  - Simulação de Monte Carlo para “n” voos consecutivos
  - Validação do modelamento SR usando o sistema-piloto hidráulico
  - Análise dos resultados
  - Conclusões e Considerações Finais



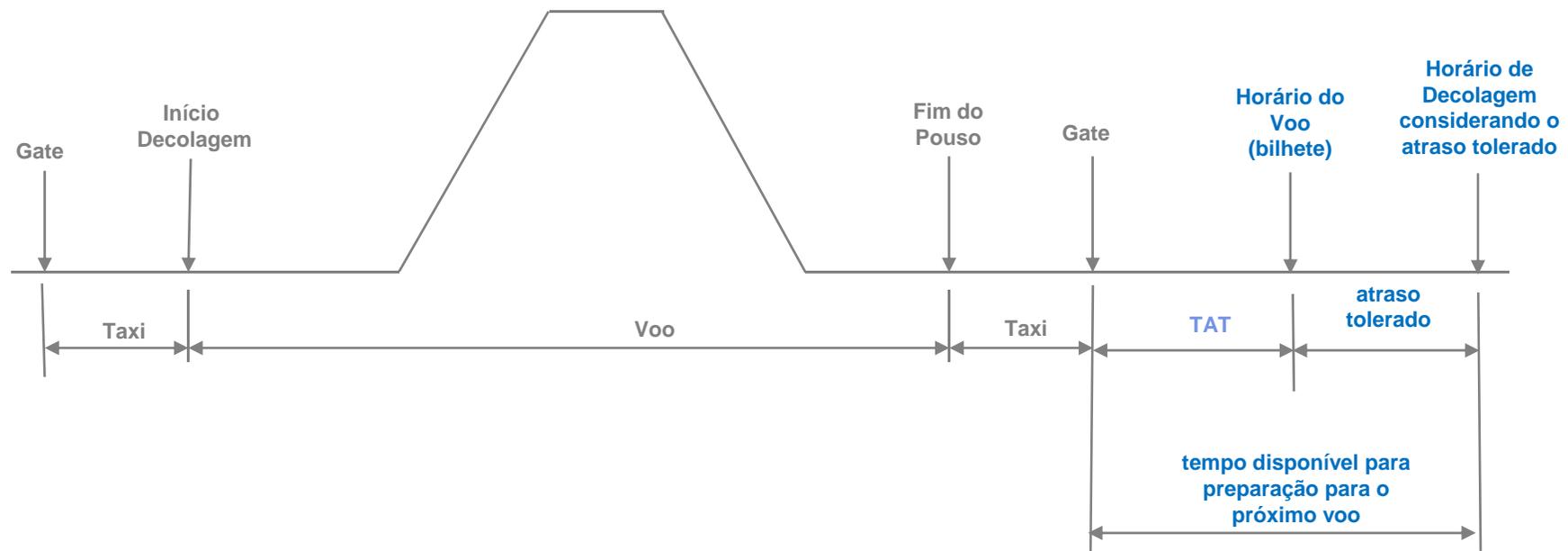
Caracterização do SR utilizando a figura de Confiabilidade “Disponibilidade Pontual”



DISPONIBILIDADE PONTUAL  $A(t)$  depende da CONFIABILIDADE e MANTENABILIDADE  $\rightarrow A(t) = f(R(t) + M(T))$



## Modelo de 1 Voo



### Tempos Operacionais:

Taxi ..... 5 minutos  
Voo ..... 80 minutos  
TAT (turn around time) ..... 30 minutos  
Atraso tolerado ..... 15 minutos  
**Total ..... 135 minutos = 2h:15' = 2,25 horas**

### Processo do Modelamento:

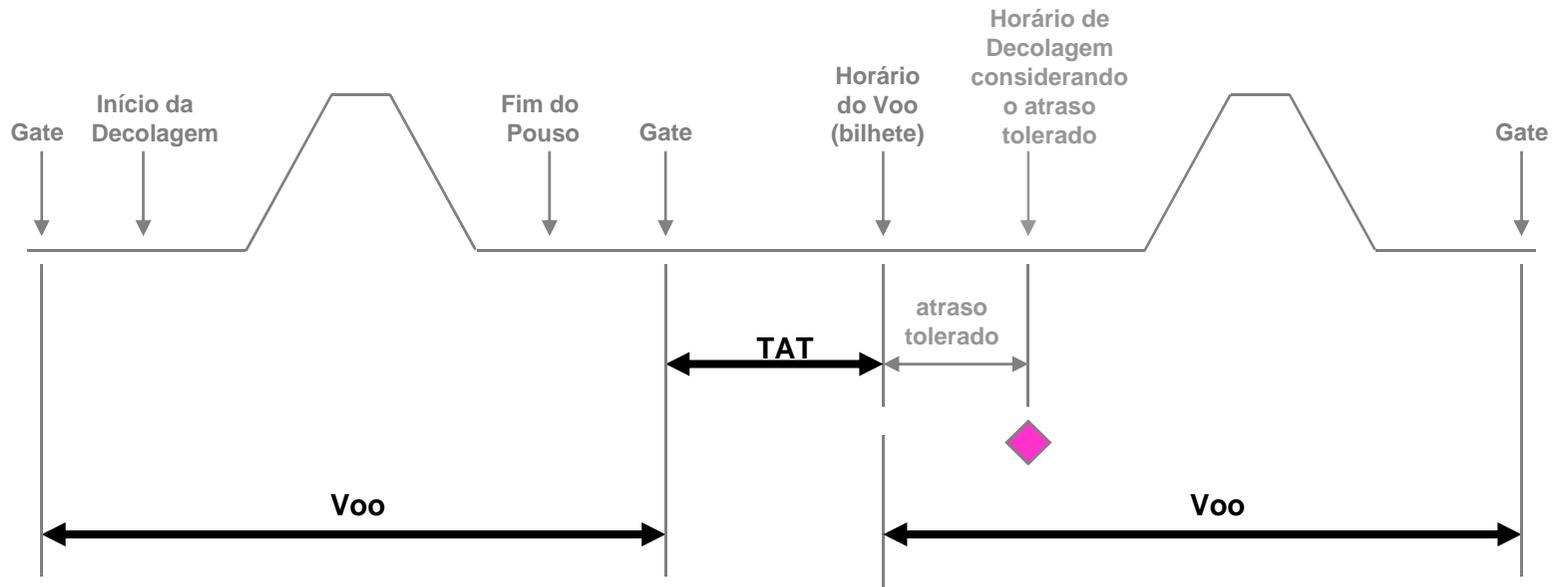
- Caracterização da Despachabilidade
- Modelamento de 1 voo
- Modelamento de 2 voos consecutivos
- Simulação de Monte Carlo para "n" voos consecutivos
- Validação do Modelamento
- Resultados



# Modelo de 2 Voos Consecutivos



## 1º Caso: Sem a ocorrência de falha durante o voo



◆ ... Ponto de Decisão

SR .... Schedule Reliability  
(Despachabilidade)



**NÃO AFETA O SR !**

### ▪ Processo do Modelamento:

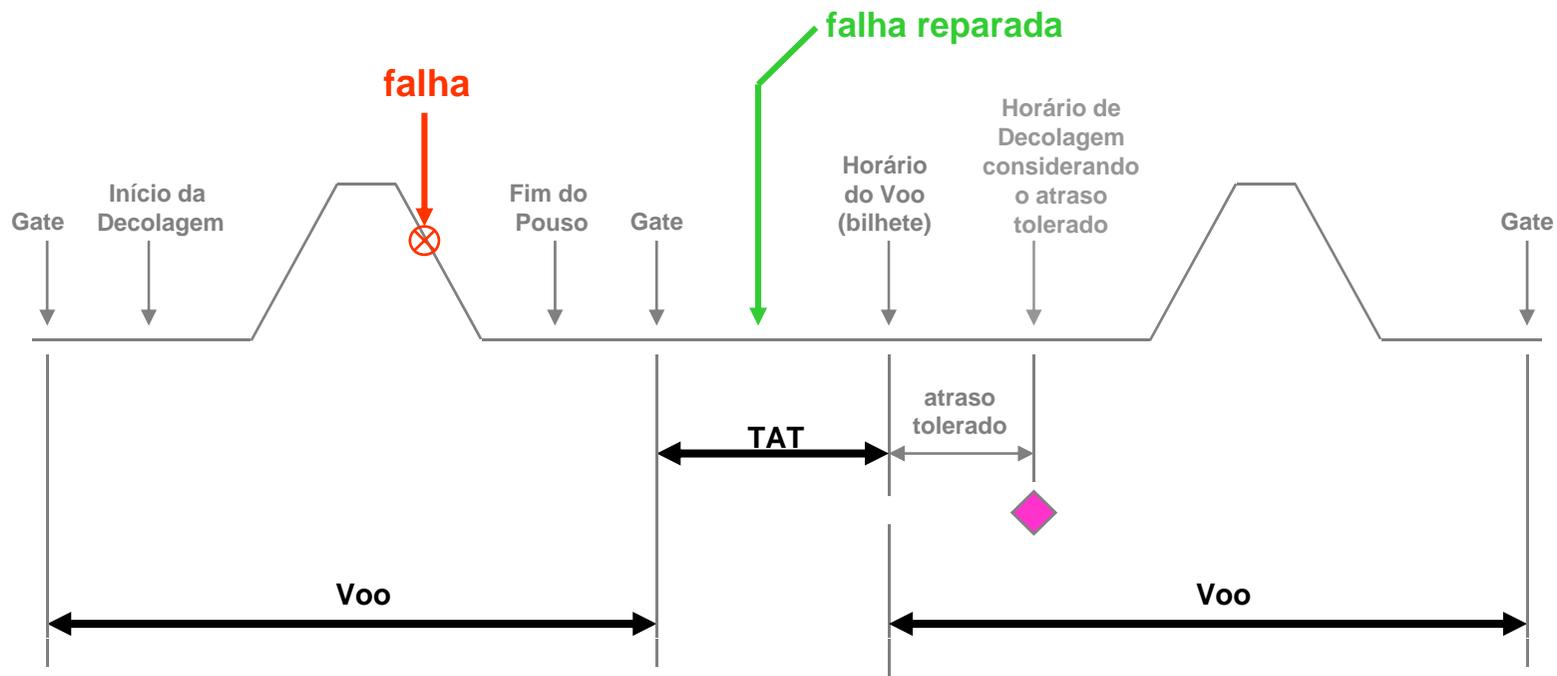
- Caracterização da Despachabilidade
- Modelamento de 1 voo
- Modelamento de 2 voos consecutivos
- Simulação de Monte Carlo para "n" voos consecutivos
- Validação do Modelamento
- Resultados



## Modelo de 2 Voos Consecutivos



2º Caso: A falha ocorre em voo e, após o pouso, a intervenção de manutenção ocorre em tempo inferior ao TAT (Turn Around Time)



◆ ... Ponto de Decisão



**NÃO AFETA O SR !**

### Processo do Modelamento:

- Caracterização da Despachabilidade
- Modelamento de 1 voo
- Modelamento de 2 voos consecutivos
- Simulação de Monte Carlo para "n" voos consecutivos
- Validação do Modelamento
- Resultados

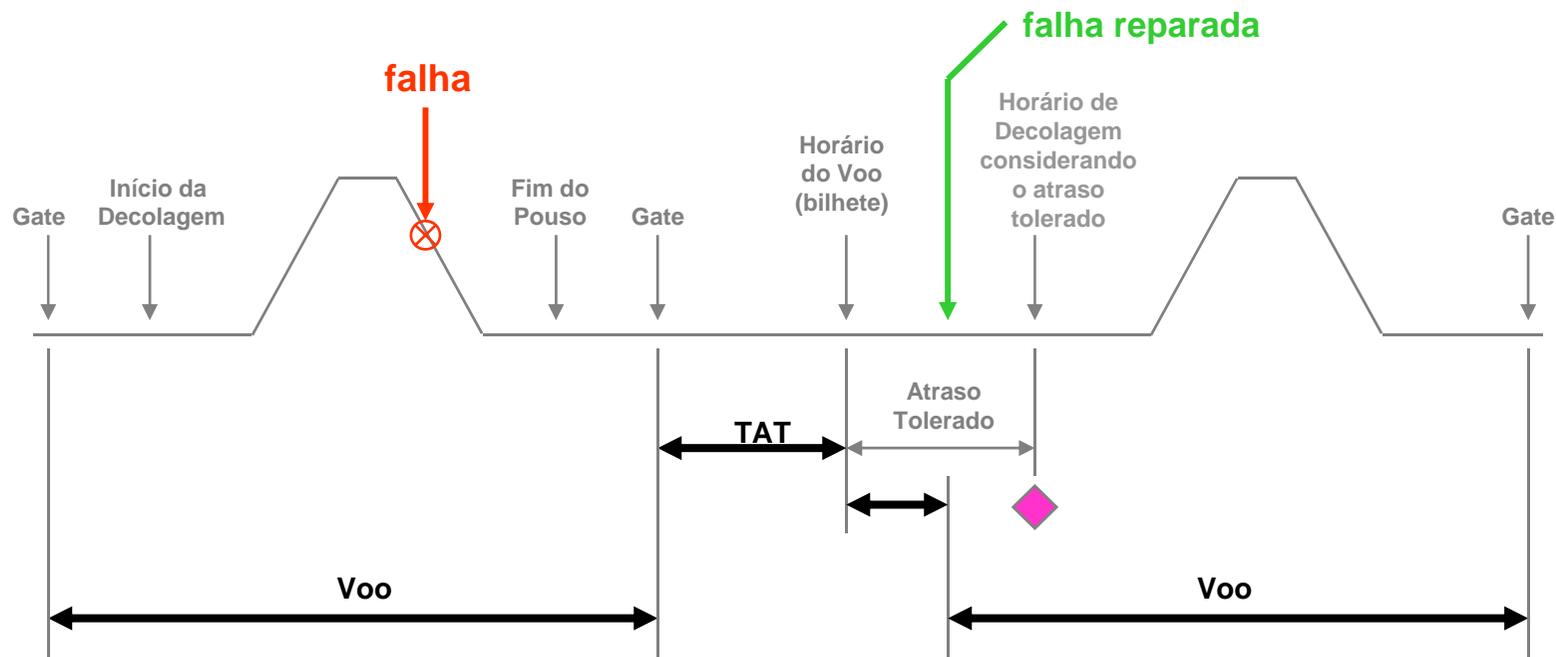
15



## Modelo de 2 Voos Consecutivos



3º Caso: A falha ocorre em voo e, após o pouso, a intervenção de manutenção ocorre em tempo superior ao TAT, porém, não excedendo o “atraso tolerado” de 15 minutos



◆ ... Ponto de Decisão

TAT ... Turn Around Time



**NÃO AFETA O SR !**

### Processo do Modelamento:

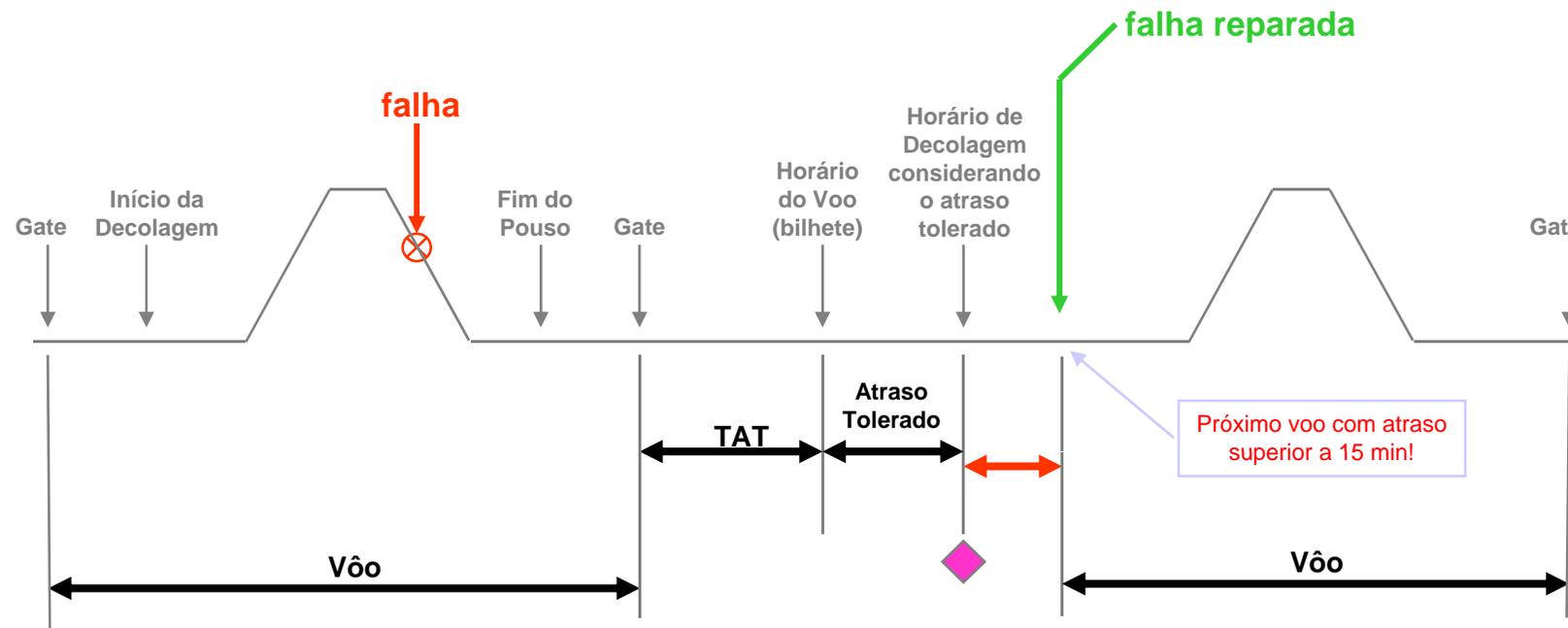
- Caracterização da Despachabilidade
- Modelamento de 1 voo
- Modelamento de 2 voos consecutivos
- Simulação de Monte Carlo para “n” voos consecutivos
- Validação do Modelamento
- Resultados



## Modelo de 2 Voos Consecutivos



4º Caso: A falha ocorre em voo e, após o pouso, a intervenção de manutenção ocorre em tempo superior ao TAT e excedendo o “atraso tolerado” de 15 minutos



◆ ... Ponto de Decisão

TAT ... Turn Around Time



**AFETA O SR !**

### Processo do Modelamento:

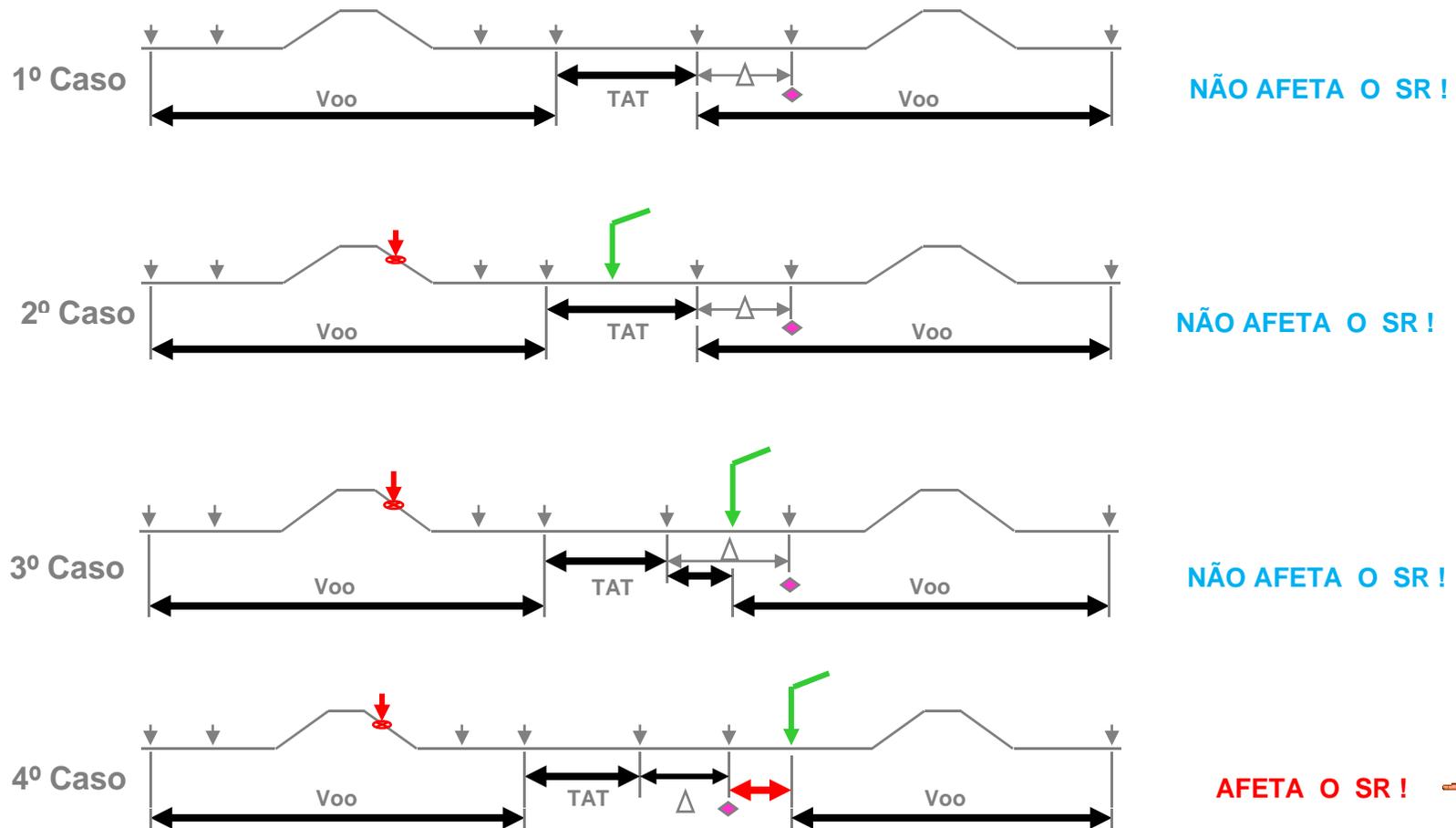
- Caracterização da Despatchabilidade
- Modelamento de 1 voo
- Modelamento de 2 voos consecutivos
- Simulação de Monte Carlo para “n” voos consecutivos
- Validação do Modelamento
- Resultados



# Modelo de 2 Voos Consecutivos



## Resumo





# Modelo para “n” Voos Consecutivos

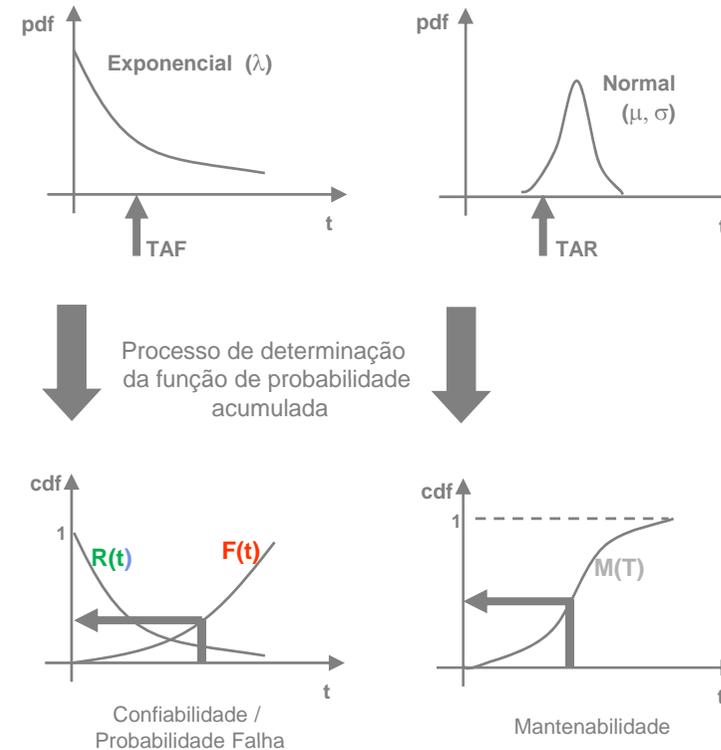


Metodologia para obtenção das métricas de Confiabilidade de uma arquitetura de sistema através do processo direto de LDA (Life Data Analysis):

1. Obtenção dos Dados de Vida do item (TAF/TAR);
2. Determinação da distribuição (pdf) aderente aos dados;
3. Determinação da função de probabilidade acumulada(cdf);
4. Determinação das métricas de Confiabilidade ( $\lambda$ , MTBF,  $R(t)$ ,  $F(t)$ , etc.)

▪ **Processo do Modelamento:**

- Caracterização da Despachabilidade
- Modelamento de 1 voo
- Modelamento de 2 voos consecutivos
- **Simulação de Monte Carlo para “n” voos**
- Validação do Modelamento
- Resultados



TAF ... tempo até falha

TAR ... tempo até reparo



# Modelo para “n” Voos Consecutivos



Metodologia para obtenção da Disponibilidade de uma arquitetura de sistema complexa através do processo de RDB com **Simulação de Monte Carlo**:

$$A(t) = R(t) + \int_0^t R(t-u)m(u)du$$

DISPONIBILIDADE PONTUAL A(t) depende da:  
CONFIABILIDADE e MANTENABILIDADE

1. Geração de um conjunto números aleatórios, uniformemente distribuídos entre 0 e 1;
2. Determinação da função inversa da Probabilidade Acumulada;
3. Alimentação da função inversa da Probabilidade com esse conjunto de números aleatórios para determinação dos tempos (TAF e TAR) para cada simulação:

CONFIABILIDADE		MANTENABILIDADE		DISPONIBILIDADE PONTUAL A(t)
TAF @ VOO		TAR @ SOLO		
SIM	NÃO	SIM	NÃO	
	X			1
X		X		1
X			X	0

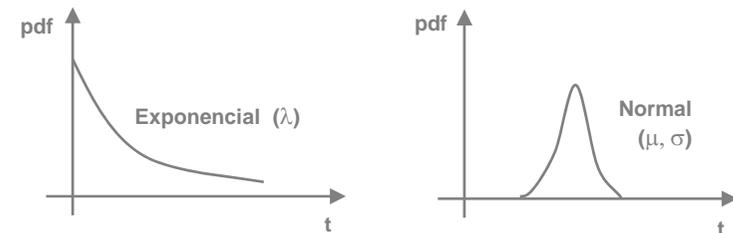
4. Determinação da Disponibilidade Pontual A(t) para todas as simulações através dos contadores de TAF, TAR e A(t)

n ... número de simulações

- **Processo do Modelamento:**
  - Caracterização da Despatchabilidade
  - Modelamento de 1 voo
  - Modelamento de 2 voos consecutivos
  - **Simulação de Monte Carlo para “n” voos**
  - Validação do Modelamento
  - Resultados

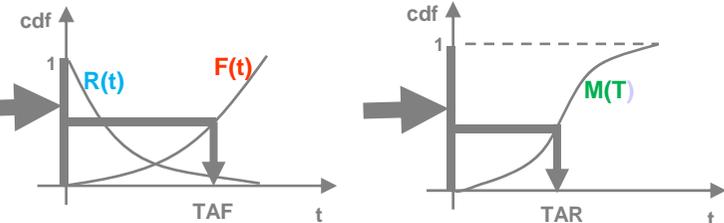
n	A(t)
1	1
2	1
3	0
...	...
n	1
	$\Sigma "1"/n$

MANTENABILIDADE



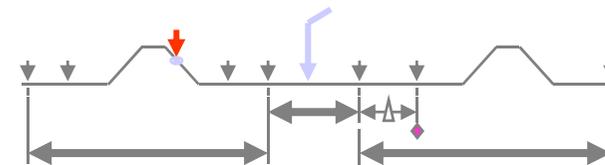
Processo de determinação dos tempos através da função inversa de probabilidade acumulada

Gerador Números Aleatórios

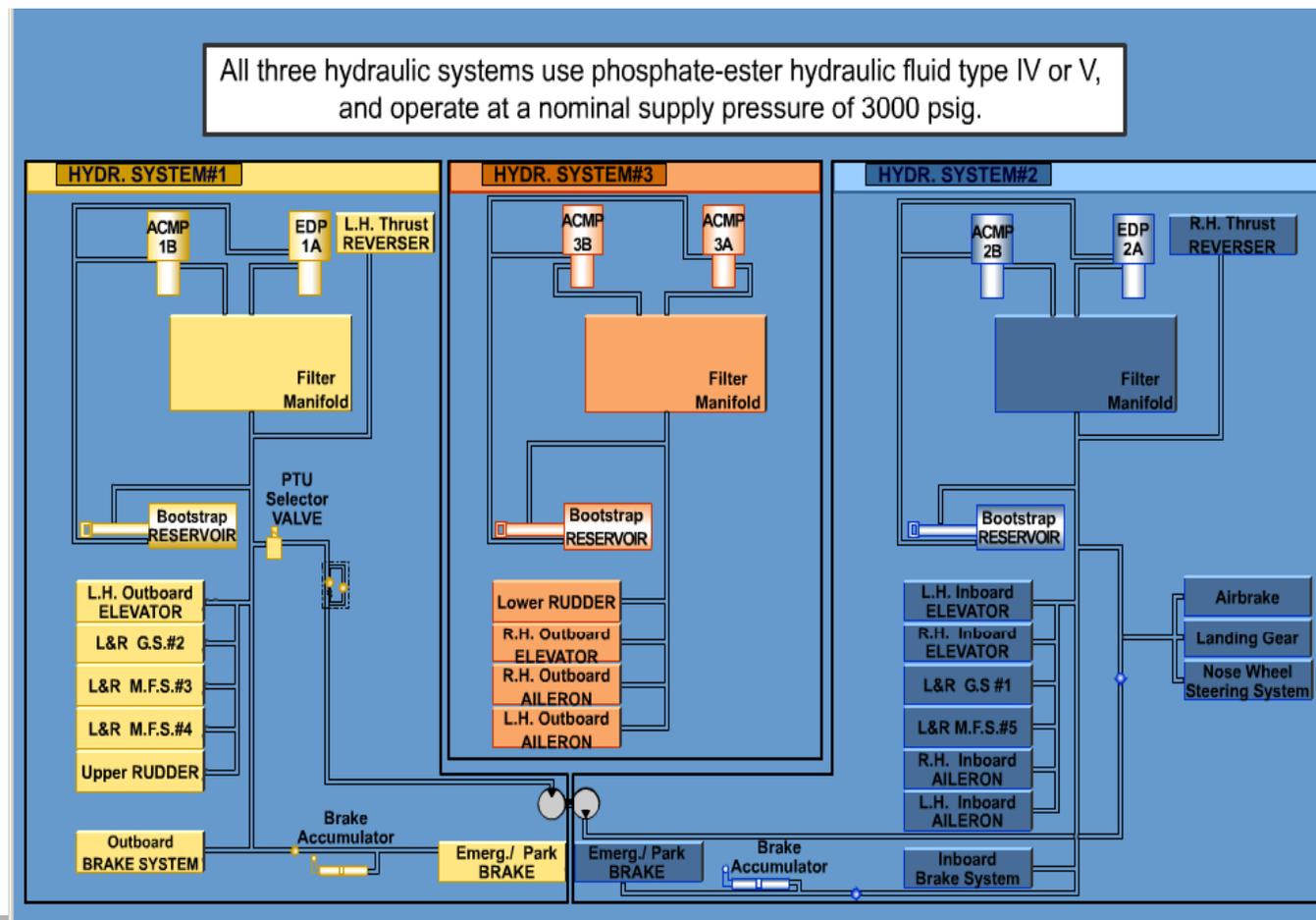


TAF1, TAF2, TAF3, ... TAFn

TAR1, TAR2, TAR3, ... TARn



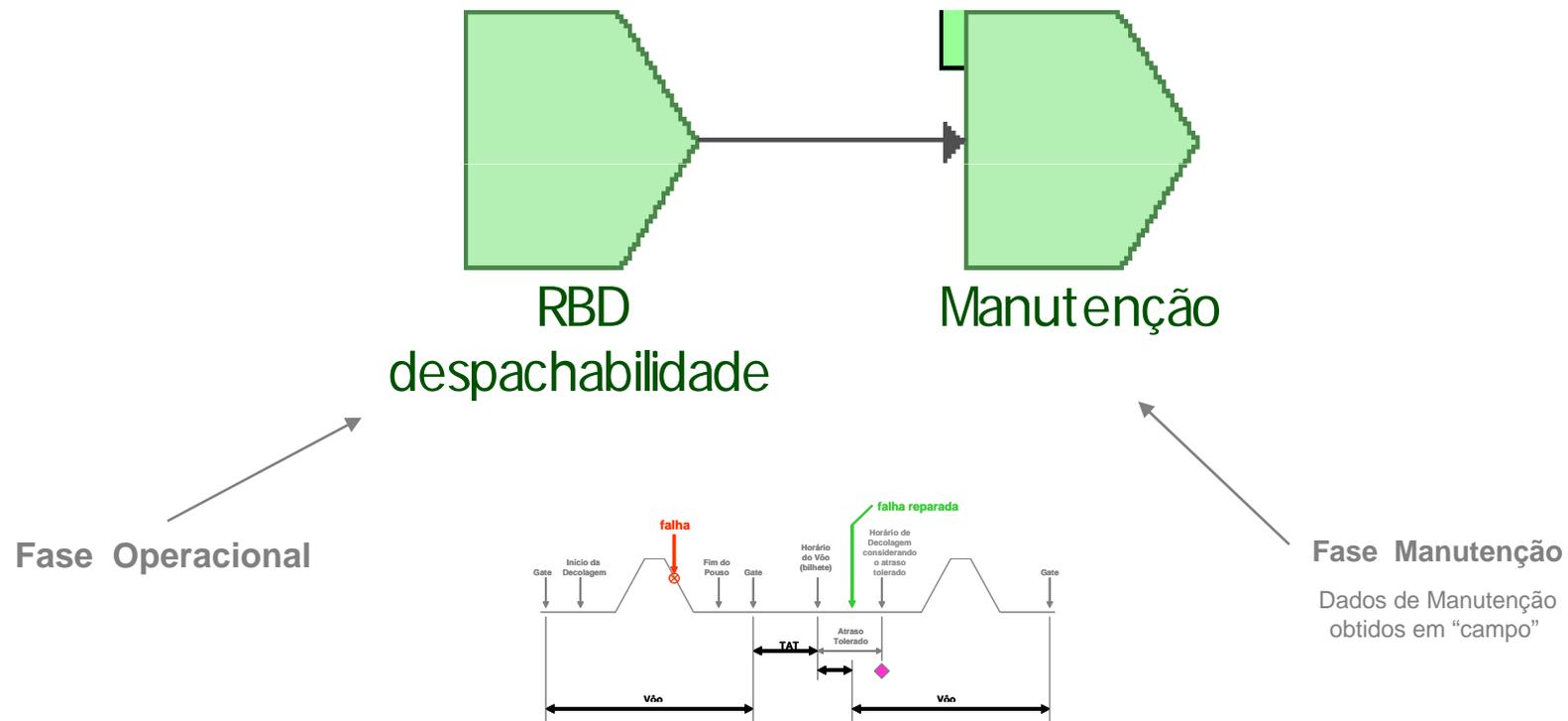
## Sistema - Piloto (sistema hidráulico)



- **Processo do Modelamento:**
  - Caracterização da Despachabilidade
  - Modelamento de 1 voo
  - Modelamento de 2 voos consecutivos
  - Simulação Monte Carlo para “n” voos
  - [Validação do Modelamento](#)
  - Resultados



## Diagrama de Fases (sistema hidráulico)

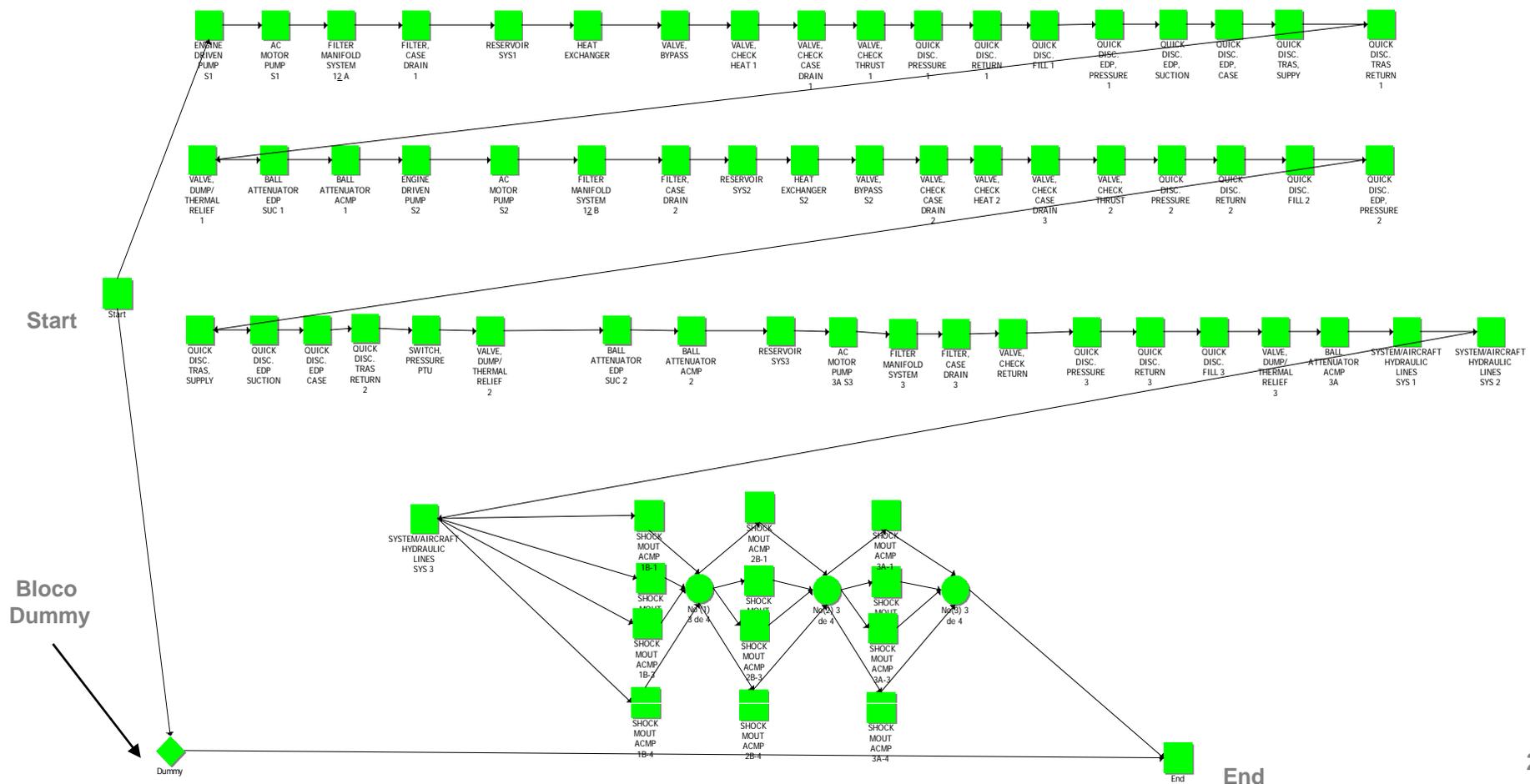




# Validação do modelamento SR



## RBD do sistema hidráulico

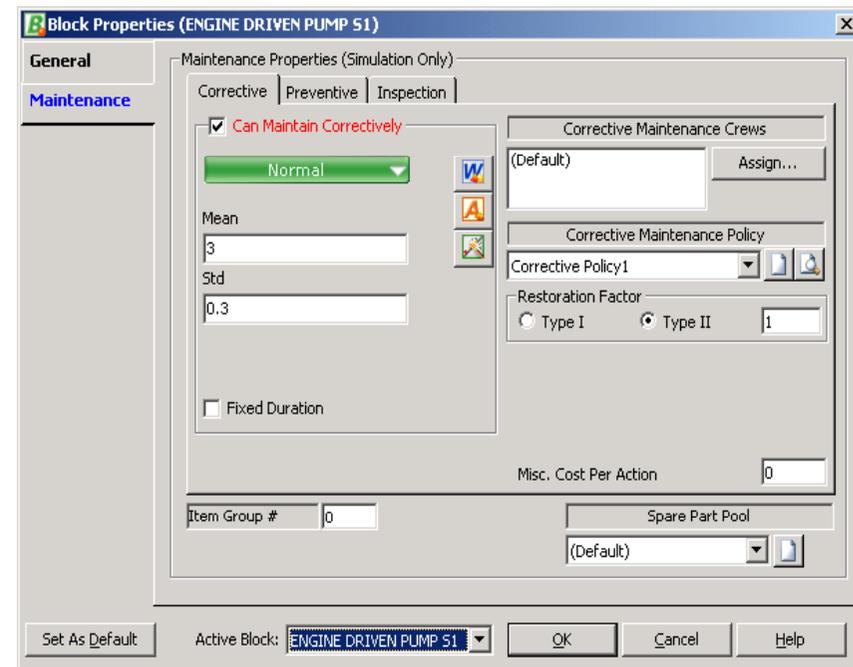
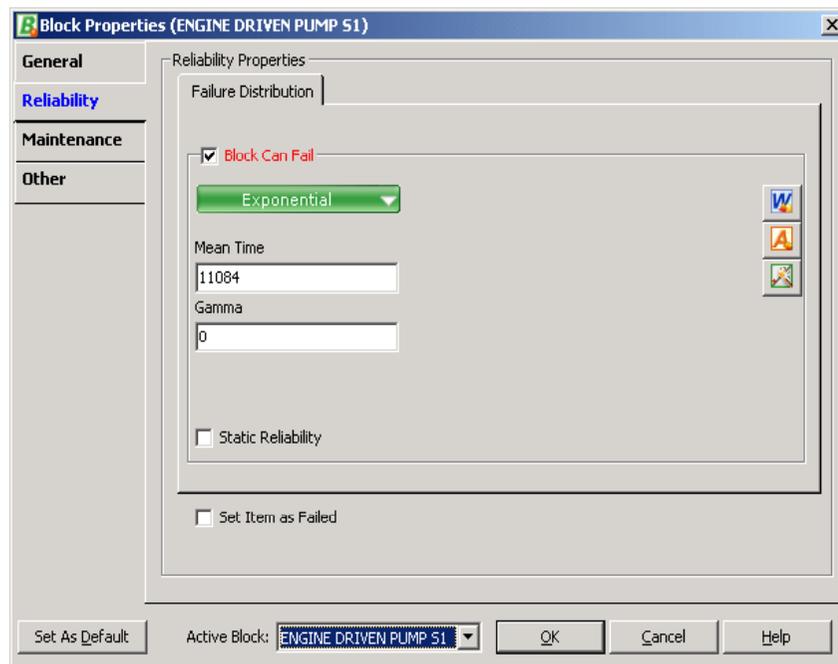




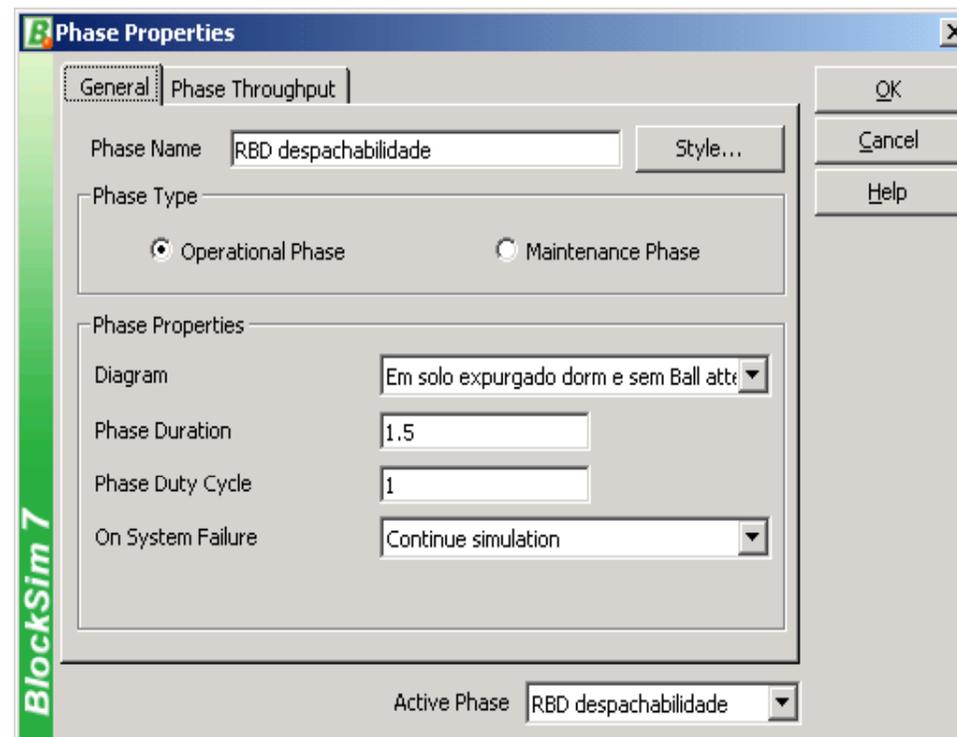
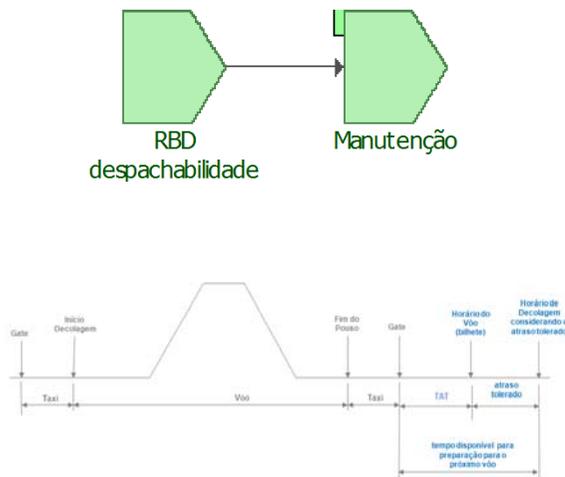
# Validação do modelamento SR



## Propriedades do Bloco “Engine Driven Pump S1” (sistema hidráulico)



## Propriedades da Fase Operacional (sistema hidráulico)



### 2. O Diagrama de Fases contém 2 fases:

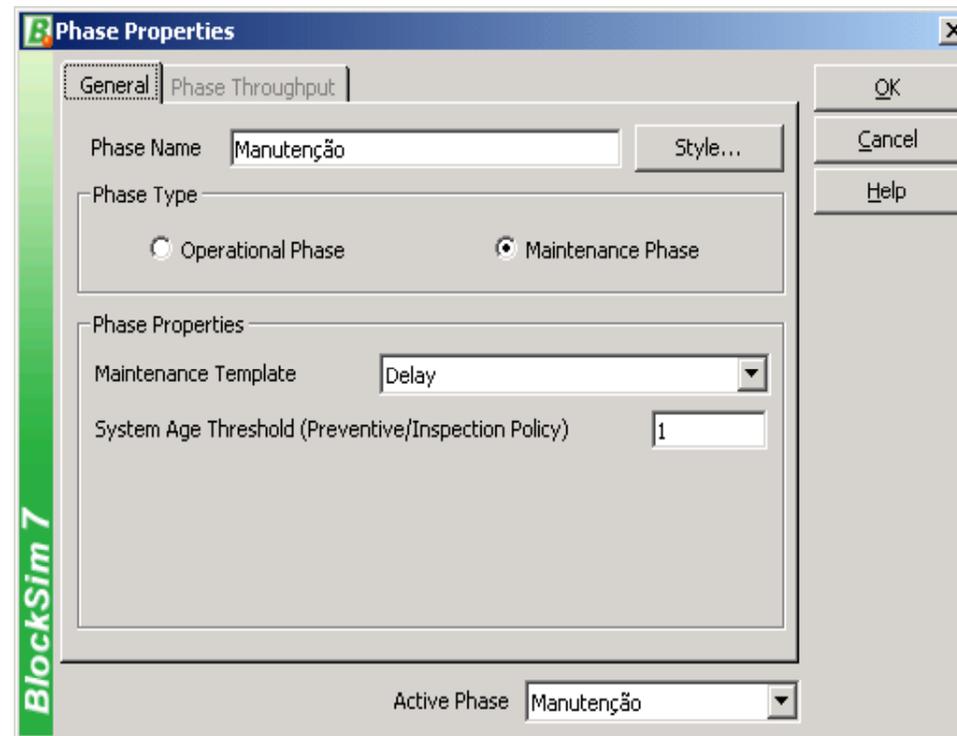
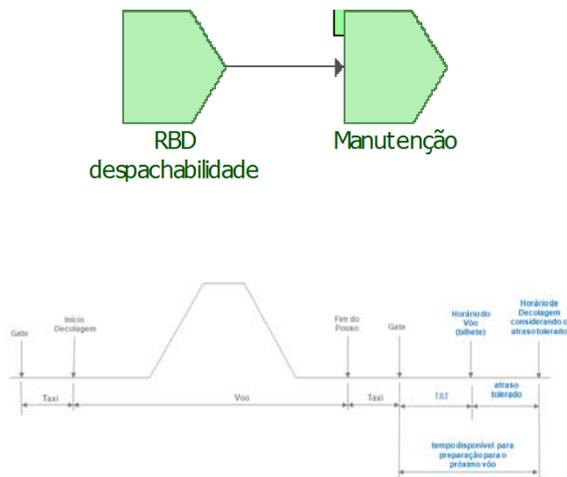
- Operacional com duração de 1,5 horas (90 min)
- Manutenção com duração de 30 min + 15 min atraso tolerado + eventual tempo de reparo adicional



# Validação do modelamento SR



## Propriedades da Fase Manutenção (sistema hidráulico)

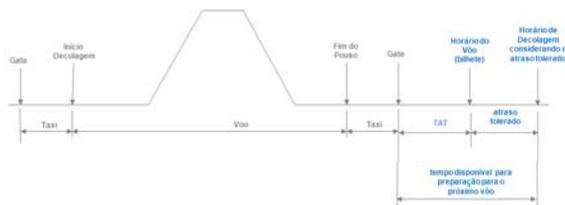




# Validação do modelamento SR

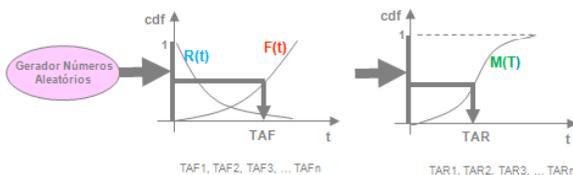


## Simulação Monte Carlo (sistema hidráulico)



### Tempos Operacionais:

Taxi ..... 5 minutos  
 Vôo ..... 80 minutos  
 TAT (turn around time) ..... 30 minutos  
 Atraso tolerado ..... 15 minutos  
 Total ..... 135 minutos = 2h:15' = 2,25 horas

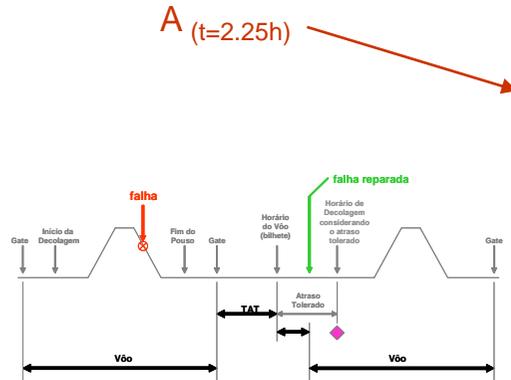




# Resultados da Simulação Monte Carlo



## Sistema Hidráulico



$$A(t) = R(t) + \int_0^t R(t-u)m(u)du$$

DISPONIBILIDADE PONTUAL A(t) depende da:  
**CONFIABILIDADE** e **MANTENABILIDADE**

System Overview	
<u>General</u>	
Mean Availability (All Events):	0.7777
Std Deviation (Mean Availability):	0.0037
Mean Availability (w/o PM & Inspection):	0.9996
Point Availability (All Events) at 2.25:	0.9989
Reliability at 2.25:	1
Expected Number of Failures:	0
Std Deviation (Number of Failures):	0
MTTF:	32460.6384
<u>System Uptime/Downtime</u>	
Uptime:	1.7498
CM Downtime:	0.0008
Inspection Downtime:	0
PM Downtime:	0.4994
Total Downtime:	0.5002
<u>System Downing Events</u>	
Number of Failures:	0
Number of CMs:	0.0011
Number of Inspections:	0
Number of PMs:	0.9989
Total Events:	1

A (t=2.25h)

Disponibilidade Pontual @ 2.25h = 0.9989

11 Indisponibilidades em 10000 simulações

9989 disponibilidades em 10000 simulações

- Processo do Modelamento:
  - Caracterização da Despachabilidade
  - Modelamento de 1 voo
  - Modelamento de 2 voos consecutivos
  - Simulação Monte Carlo para "n" voos
  - Validação do Modelamento
  - Resultados



## Conclusão e Considerações Finais



O Modelamento de SR (Schedule Reliability - Despachabilidade) feito para o Sistema Hidráulico como estudo-piloto, usando ferramentas de RBD com Fases de Voo caracterizou bem a Despachabilidade dentro do cenário operativo de uma frota de aeronaves comerciais;

Este trabalho permitiu uma boa Visibilidade e Conceituação das atividades de Confiabilidade e Mantenabilidade no ciclo de vida da aeronave;

O processo de Simulação de Monte Carlo, presente no software aplicativo, permitiu caracterizar a Disponibilidade Pontual como métrica de Confiabilidade representando a Despachabilidade de uma frota de aeronaves comerciais;

Conscientização da importância dos Dados de Vida dos componentes e equipamentos na fase inicial de projeto (predição, procedência, ensaios acelerados, etc.);

Elaboração de um conjunto de recomendações para a fase de desenvolvimento de um projeto aeronáutico para a construção do RBD e determinação do SR.



Organização Brasileira  
para o Desenvolvimento  
da Certificação Aeronáutica

# Obrigado !

# Perguntas?



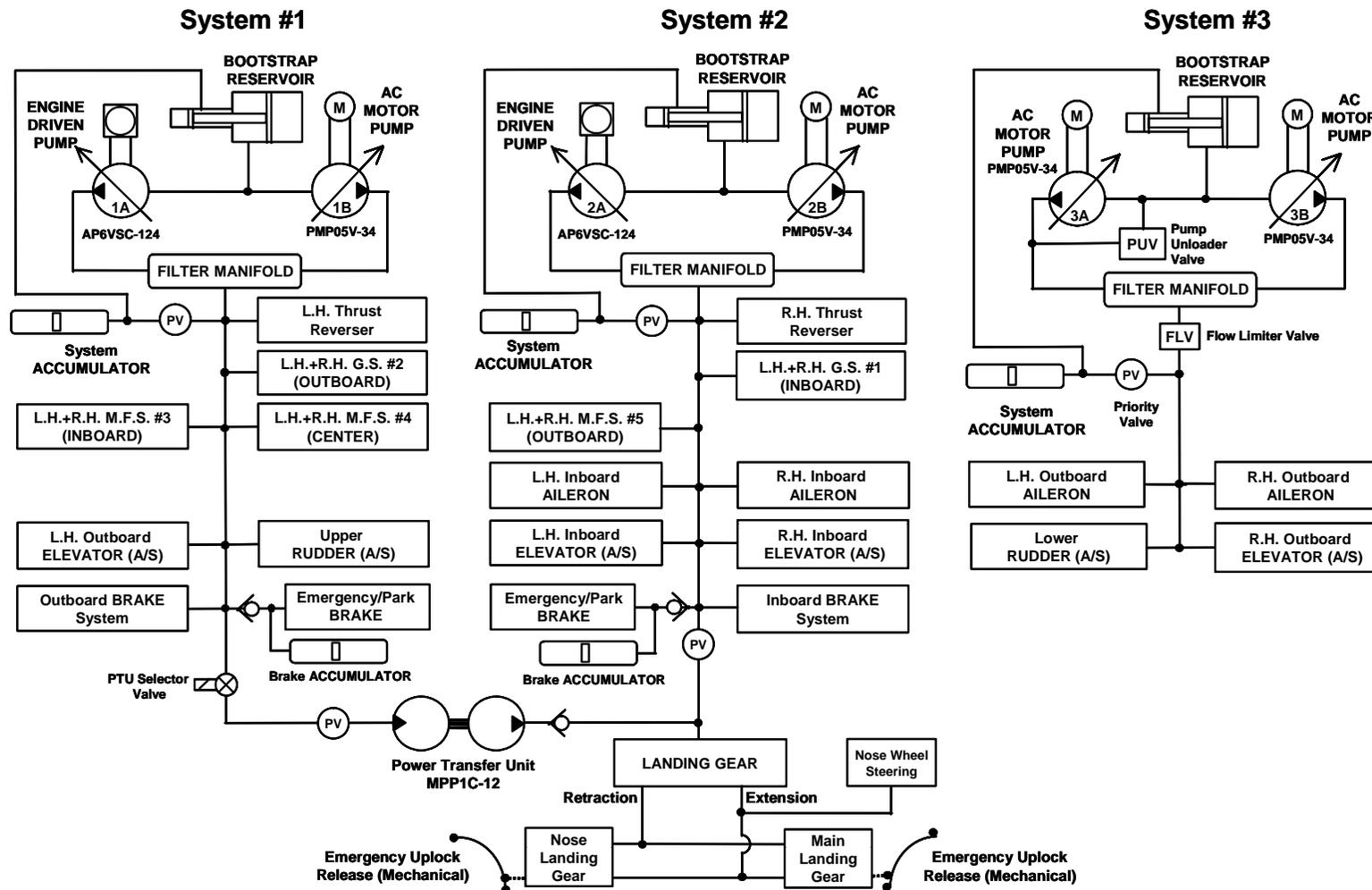
*Jaures Cardoso Jr., eng*

*Systems Reliability & Safety Engineer*

*Systems Engineering, Defense Market*

*Embraer Ext 4537*

30





**NOME:** Jaures Cardoso Júnior

**EMPRESA:** Embraer S.A.

**CARGO:** Responsável Tecnológico de Engenharia nas áreas de  
Confiabilidade, Integração e Segurança de Sistemas  
Aeronáuticos Embarcados

**GRADUAÇÃO:** Engenheiro Eletrônico pela Escola de Engenharia Mauá

**ESPECIALIZAÇÕES:** CRP ReliaSoft, 2008  
Confiabilidade de Sistemas – ITA, 2007  
Mecatrônica – ITA, 2001  
Reliability & 1309 Design Analysis for Aircraft Systems – EUA, 2000  
Safety Assessment of Aircraft Systems - England, 2000  
Flight Instrumentation SFIM - France, 1980

**PRINCIPAIS ATIVIDADES:** Consultoria em Confiabilidade e Safety Assessment  
Instrutor e Mentor para o Programa de Especialização Embraer  
Representante Credenciado de Engenharia pela ANAC



## Sistema-piloto ATA 29 (sistema hidráulico)

### PREMISSAS:

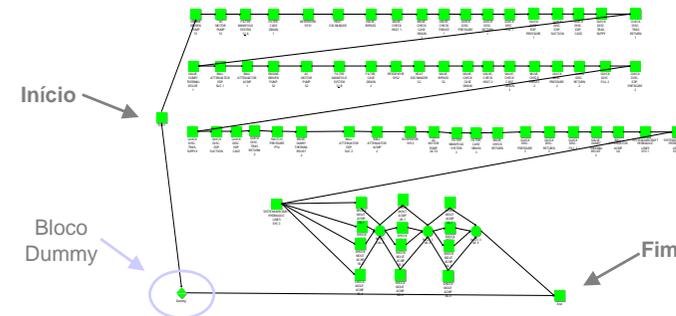
1. Antes de cada voo, supõe-se que tanto o avião como seus componentes estão em estado novo.
2. O Diagrama de Fases contém 2 fases:
  - a) Operacional com duração de 1,5 horas (90 min)
  - b) Manutenção com duração de 30 min + 15 min atraso tolerado + eventual tempo de reparo adicional
3. A fase operacional contém um bloco “dummy” que não falha para garantir a continuidade do voo de 90 min, independente da falha de componentes
4. A fase de manutenção contém um bloco “dummy” com manutenção preventiva de 30 min para garantir que o avião permaneça em solo por no mínimo 30 minutos
5. Todas as falhas que ocorrerem durante o voo serão consertadas em solo
6. Se todos os reparos forem completados nesse período de 30 minutos, o avião estará pronto e entrará numa nova fase operacional
7. Se os reparos levarem mais do que 30 min, a fase de manutenção durará até que todos os reparos sejam completados
8. A duração da simulação é de 135 min (90 + 30 + 15) para obter a disponibilidade pontual no fim deste período
9. Este cenário é repetido por 10000 simulações
10. Os tempos de reparo dos componentes têm um Distribuição Normal, com média refletindo a prática em campo e coeficiente de variação (desvio padrão / média) de 10%. Exceto para os itens de MMEL, com coeficiente de variação de 70% para representar o cenário em que 25% dos reparos durarão mais do que os 45 minutos permitidos em solo



Considerações sobre a utilização do bloco “dummy” no RBD

## Bloco “dummy” na fase de voo:

- Bloco não falha → não sofre reparo
- Objetivo é focar na confiabilidade (despachabilidade) e não no safety: o bloco “dummy” evita ter-se que considerar situações de falhas críticas na fase de voo que impediria o “safe flight and landing” do requisito aeronáutico FAR Part 25.1309.
- Está em paralelo com todos os outros blocos -> avião sempre completará o voo
- Criado para modelar o fato de que, independentemente da falha de qualquer componente, o avião continua a operar até o final do vôo de 90 min
- Os componentes que falharem só serão reparados em solo, na fase de manutenção



## Bloco “dummy” na fase de manutenção:

- Garantir que o avião permaneça em solo no mínimo de 30 min (TAT)
- As propriedades de manutenção no RBD do bloco “dummy” incluem um tempo fixo de manutenção preventiva de 30 min, que ocorrerá independentemente de haver reparo ou não em outros componentes
- Após esse tempo fixo de 30 min, se todos os componentes que falharam tiverem sido reparados, o avião está pronto para novo voo, caso contrário, a manutenção continua até que todos os componentes sejam reparados