

## Periodicidade óptima económica de MPS de um componente crítico apresentando mais de um modo de falha

- **<sup>1</sup>Rui Assis; <sup>2</sup>João Ribeiro**
- <sup>1</sup> Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias
  - <sup>2</sup> Instituto Superior de Engenharia de Lisboa
  - [rassis46@gmail.com](mailto:rassis46@gmail.com); [jprribeiro@gmail.com](mailto:jprribeiro@gmail.com)

# Será sempre verdadeiro?

- Quando um componente falha devido a **mais de um modo de falha**, será adequada a prática corrente de seleccionar o **modo de falha predominante** para basear o cálculo da periodicidade de substituição preventiva do componente?

# Modos de falha em série?

- A fiabilidade de um componente que falha devido a mais de um modo de falha deverá ser calculada considerando os **modos de falha em série?**



**ISEL**

INSTITUTO SUPERIOR DE  
ENGENHARIA DE LISBOA

# Objectivos da apresentação

- Mostrar que, no caso de um **componente crítico sujeito a mais de um modo de falha**, em determinadas condições, pode ser mais económico basear o cálculo da periodicidade óptima económica da sua substituição preventiva no conjunto dos efeitos de todos os modos de falha, do que apenas no efeito do seu modo de falha predominante (o que apresenta o menor MTTF);
- Mostrar a utilidade da **técnica de simulação de Monte-Carlo** construído em EXCEL para modelar casos complexos dificilmente moduláveis ou impossíveis de modelar analiticamente;
- Mostrar como se pode obter a **solução óptima económica** de um problema usando a técnica de simulação de Monte-Carlo, recorrendo a uma análise de sensibilidade;
- Denunciar o erro relativamente comum de se considerar a análise de um conjunto de modos de falha de um mesmo componente como tratando-se de um **sistema de fiabilidade série**.

# Enquadramento

- Tese de mestrado em **Engenharia Biomédica** do **ISEL** em fase de finalização, consistindo na análise de um equipamento de **tomografia computadorizada** de última geração visando a selecção das **políticas de manutenção** mais adequadas (**RCM**);
- Tudo começou com uma análise **FMEA** até aos **LRU's**;
- A **ampola** geradora de **raios X** foi um dos componentes críticos, neste caso apresentando **7 modos de falha** (m.f.);
- E a **dúvida** surgiu no momento de seleccionar a política de manutenção mais adequada e, também, a oportunidade para esta apresentação com um **caso fictício reunindo apenas 3 m.f.**

# Caso exemplificativo



**ISEL**  
INSTITUTO SUPERIOR DE  
ENGENHARIA DE LISBOA

## 1º passo: Recolha e ajustamento dos dados disponíveis.

- Intervenções registadas por **modos de falha** e por **datas de intervenção**;
- Ajustamento das datas das intervenção pelo regime médio de funcionamento em **horas/dia (15) dias/ano (230)** para obtenção dos **TTM's**.

Ordem	Eventos	Datas	Momentos ajustados	Tempo entre manutenções (TTM <sub>pc</sub> )	Censuras	Tempo parado (TTR <sub>pc</sub> )
1	Início registos	28-ago-16	-		-	-
2	MC (pára)	09-set-16	113	113	S	-
3	Arranca	10-set-16	123		-	10
4	MP (pára)	04-out-16	350	227	S	-
5	Arranca	05-out-16	359		-	9
6	MC (pára)	30-out-16	595	236	-	-
7	Arranca	01-nov-16	614		-	19
8	MC (pára)	11-nov-16	709	95	-	-
9	Arranca	12-nov-16	718		-	9
10	MC (pára)	05-dez-16	936	217	-	-
11	Arranca	14-dez-16	1.021		-	85
12	MC (pára)	02-jan-17	1.200	180	-	-
13	Arranca	04-jan-17	1.219		-	19
14	MP (pára)	22-jan-17	1.389	170	S	-
15	Arranca	23-jan-17	1.399		-	10
16	Hoje	13-fev-17	1.597	198	S	-

# Caso exemplificativo

**2ª passo: Determinação dos **parâmetros** da distribuição de probabilidade teórica de melhor aderência aos dados empíricos de cada modo de falha.**

- Verificação de que os TTF's são **i.i.d.** pelo **teste de Laplace**, ou seja, de que o processo é (ou não) **Poisson homogéneo**;
- Existindo dados a censurar, recorreremos ao método de regressão conhecido por **aproximação de Bernard** (podíamos também optar pelo método da **máxima verosimilhança**);
- Os **parâmetros** (localização  $t_0$ ; forma  $\alpha$ ; escala  $\beta$ ) obtidos para cada um dos 3 modos de falha foram os seguintes:
  - m.f. A: Distribuição **Weibull** com os parâmetros:  **$t_0 = 0$ ;  $\alpha = 2,8$ ;  $\beta = 3.900$  horas**
  - m.f. B: Distribuição **Weibull** com os parâmetros:  **$t_0 = 0$ ;  $\alpha = 3,5$ ;  $\beta = 4.100$  horas**
  - m.f. C: Distribuição **Weibull** com os parâmetros:  **$t_0 = 0$ ;  $\alpha = 1,9$ ;  $\beta = 2.950$  horas**

# Caso exemplificativo

## 3º passo: Selecção da política de manutenção.

Recorrendo ao diagrama de decisão do RCM, concluímos que a política de manutenção **condicionada** (*on-line*) poderia ser possível se o equipamento estivesse dotado de sensores que permitissem medir a progressão da degradação conducente a cada modo de falha – o que não era o caso – e as inspecções no local (*off-line*) também não são exequíveis. Em consequência, decidimos explorar a possibilidade de **substituição preventiva sistemática** em alternativa à **substituição correctiva**.



# Caso exemplificativo

**4º passo:** Criação de um modelo de simulação de Monte-Carlo do funcionamento do componente, podendo falhar por qualquer um dos 3 modos de falha, de modo a apurar a **disponibilidade** e o **custo** da política de **MPS** para cada alternativa da periodicidade de substituição e seleccionar a melhor (**Menor custo? Maior disponibilidade?**)

## **Outros dados considerados:**

- Capacidade do equipamento = **30 unidades/hora**
- Margem de contribuição = **100 €/unidade**
- Custo de um componente = **200 €**
- Tempo médio de MC = **5 horas**
- Tempo médio de MPS = **2 horas**
- Custo da m.d.o. = **25 €/hora**

# Exemplo de uma iteração no simulador

	mf(A)	mf(B)	mf(C)	
$t_0 =$	0	0	0	horas
$\alpha =$	2,8	3,5	1,9	
$\beta =$	3.900	4.100	2.950	horas
$F(t = 350) =$	0,001169918	0,000181742	0,01726991	
MTTF =	3.473	3.689	2.618	horas
MTTR =	3.519	3.648	2.578	horas

Quando um dos modos de falha se manifesta, o componente é substituído perdendo-se assim qualquer memória dos restantes modos de falha.  
Ao contrário, num sistema composto por 3 componentes em série. Quando um componente falha, só este é substituído, voltando ao estado de novo. Os restantes mantêm memória e continuam a funcionar até falharem por sua vez.

Capacidade =	30	unidades/hora	Custo de MC =	15.325	€/intervenção
Regime =	15	horas/dia	Custo de MPS =	250	€/intervenção
	230	dias/ano	MTTF =	1.992	horas
m.c. =	100	€/unidade	$R(t = 350) =$	0,99	
Custo componente =	200	€	$\bar{t} =$	227	horas
Tempo de MC =	5	horas/intervenção	$\bar{\theta} =$	349	horas
Tempo de MPS =	2	horas/intervenção	MTTR =	2,03	horas
Custo de m.d.o. =	25	€/hora	$D =$	0,9942	
			Custo =	1,14	€/hora
Missão (t) =	350	horas		3.933	€/ano

	TTF do mf A	TTF do mf B	TTF do mf C	TTF do componente (sem MPS)	Vida do componente (com MPS)	Tempo de substituição do componente (horas)	Vida até t = 350 horas	Tempo acumulado (horas)	Custo de manutenção (€/intervenção)
1	3.977	4.602	2.576	2.576	350	2	-	352	250
2	3.448	5.052	3.229	3.229	350	2	-	704	250
3	4.874	3.829	6.416	3.829	350	2	-	1.056	250
4	3.017	2.434	2.683	2.434	350	2	-	1.408	250
5	3.454	4.451	1.358	1.358	350	2	-	1.760	250
6	2.605	3.612	3.297	2.605	350	2	-	2.112	250
7	1.555	4.045	1.428	1.428	350	2	-	2.464	250
8	5.059	3.620	2.923	2.923	350	2	-	2.816	250
9	1.577	5.304	3.202	1.577	350	2	-	3.168	250
10	5.515	3.086	3.064	3.064	350	2	-	3.520	250
11	3.246	3.735	1.948	1.948	350	2	-	3.872	250
12	7.201	3.482	6.853	3.482	350	2	-	4.224	250
13	5.140	3.535	3.924	3.535	350	2	-	4.576	250
14	5.049	2.636	1.498	1.498	350	2	-	4.928	250
15	4.928	4.485	805	805	350	2	-	5.280	250
16	3.871	5.255	3.094	3.094	350	2	-	5.632	250
17	881	2.633	3.103	881	350	2	-	5.984	250
18	4.402	3.970	3.424	3.424	350	2	-	6.336	250
19	6.402	5.261	3.310	3.310	350	2	-	6.688	250
20	3.064	3.261	1.629	1.629	350	2	-	7.040	250

# Análise de sensibilidade do custo a variações da periodicidade

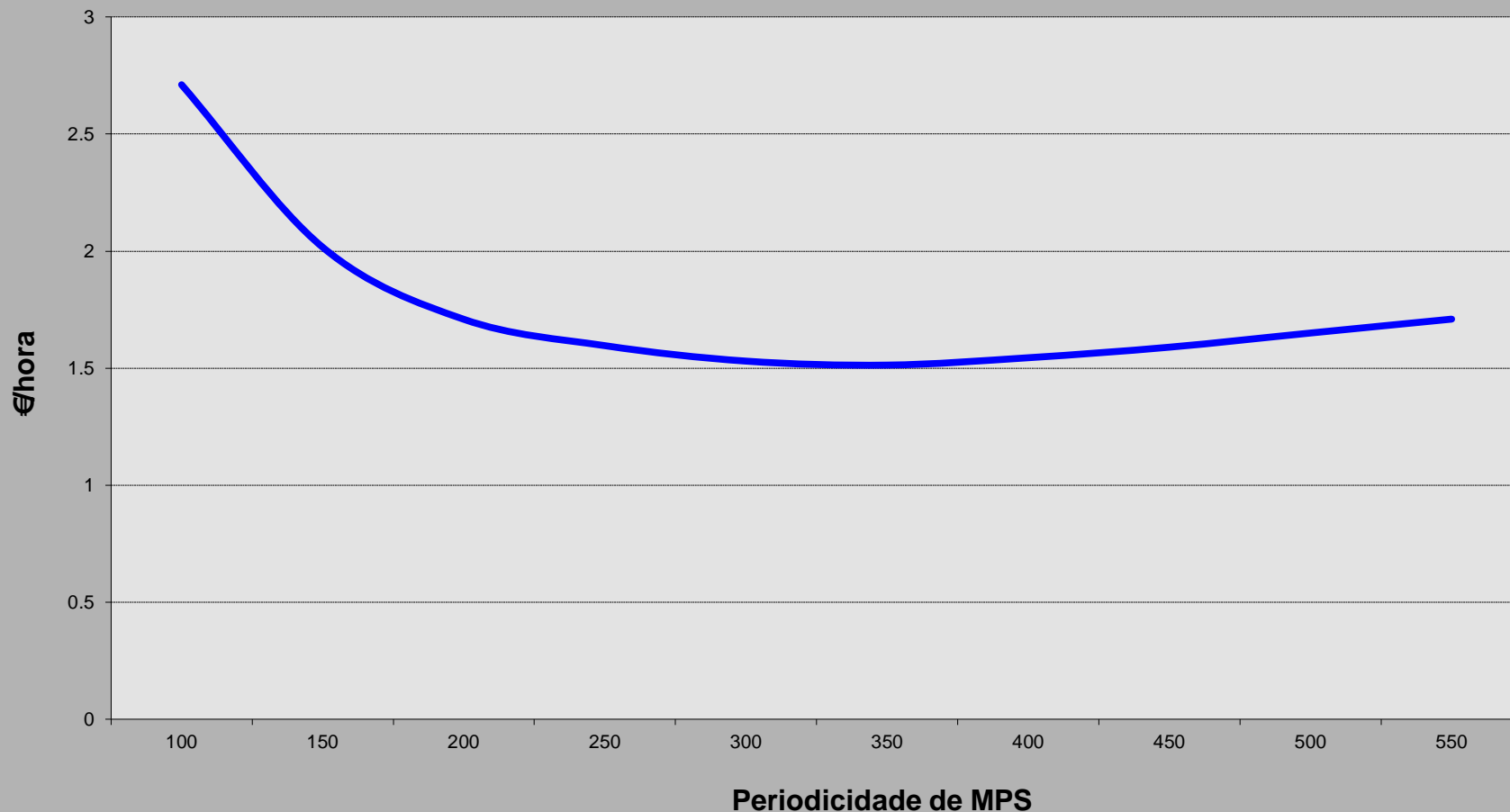
**Fase 5:** **Correr** o modelo para cada **periodicidade alternativa** um número de vezes até que o **erro amostral do valor esperado** da variável em análise atinja valores que consideremos aceitáveis (frequentemente da ordem de centenas ou mesmo milhares)

Incremento =	50			Acréscimo ao custo mínimo (%)
	Missão (t)	Custo (€/hora)	Fiabilidade	
Começando com:	100	2,701	0,998	77,73%
	150	2,013	0,996	32,43%
	200	1,714	0,994	12,79%
	250	1,599	0,990	5,22%
	300	1,527	0,986	0,45%
	<b>350</b>	1,520	0,981	0,00%
	400	1,520	0,976	0,01%
	450	1,583	0,970	4,14%
	500	1,669	0,962	9,83%
	550	1,727	0,954	13,65%

Conclusão = **A periodicidade óptima é 350**

# Análise de sensibilidade do custo a variações da periodicidade

## Custo de manutenção em função da periodicidade de MPS



# Alternativa: Modo de falha predominante

**1º passo:** Calcular por um método numérico os custos horários da política de **MPS** para várias **periodicidades alternativas**  $t_p$  de substituição do componente **com base no m.f. predominante** (m.f. C com um **MTTF = 2.618 < 3.473 (m.f. A) e < 3.689 (m.f. B)**)

$$C_{MP} = \frac{C_C \cdot F(t_p) + C_P \cdot [1 - F(t_p)]}{\bar{V}_t \cdot F(t_p) + t_p \cdot [1 - F(t_p)]}$$

$t_p$  – Intervalo de tempo entre intervenções preventivas;

$C_c$  – Custo de uma intervenção correctiva;

$C_p$  – Custo de uma intervenção preventiva;

$F(t_p)$  – Probabilidade de a intervenção ser correctiva;

$[1 - F(t_p)]$  – Probabilidade de a intervenção ser preventiva;

$\bar{V}_t$  – Vida média dos componentes que falham antes de  $t_p$ .

# Alternativa: Modo de falha predominante

Vida acumulada ( $t_p$ )	Distribuição de Weibull				Custos		
	$f(t)$	$F(t)$	$h(t)$	Vida média	Preventiva €/100 h	Corretiva €/100 h	
1	100	3,05768E-05	0,001610602	3,06261E-05	50	274,50	585,43
2	150	4,39604E-05	0,003476606	4,41137E-05	90	201,89	585,43
3	200	5,68076E-05	0,005997766	5,71503E-05	126	170,59	585,43
4	250	6,92222E-05	0,00915018	6,98615E-05	160	155,69	585,43
5	300	8,12561E-05	0,012913655	8,23192E-05	194	148,91	585,43
6	<b>350</b>	9,29367E-05	0,01726991	9,45699E-05	227	<b>146,71</b>	585,43
7	400	0,000104279	0,022201684	0,000106646	260	147,32	585,43
8	450	0,000115289	0,02769224	0,000118572	292	149,78	585,43
9	500	0,00012597	0,033725068	0,000130366	325	153,49	585,43
10	550	0,00013632	0,040283696	0,000142042	358	158,10	585,43
11	600	0,000146339	0,047351578	0,000153613	390	163,34	585,43
12	650	0,000156022	0,054912016	0,000165087	422	169,07	585,43
13	700	0,000165365	0,062948119	0,000176474	455	175,14	585,43
14	750	0,000174364	0,071442776	0,000187779	487	181,48	585,43
15	800	0,000183013	0,080378651	0,000199009	519	188,02	585,43
16	850	0,000191309	0,089738179	0,000210169	551	194,72	585,43
17	900	0,000199247	0,099503577	0,000221264	583	201,52	585,43
18	950	0,000206824	0,109656863	0,000232297	614	208,40	585,43
19	1.000	0,000214035	0,12017987	0,000243272	646	215,34	585,43
20	1.050	0,000220879	0,131054274	0,000254192	677	222,31	585,43
21	1.100	0,000227353	0,142261617	0,000265061	709	229,30	585,43
22	1.150	0,000233454	0,153783337	0,00027588	740	236,29	585,43
23	1.200	0,000239182	0,165600799	0,000286652	771	243,27	585,43
24	1.250	0,000244536	0,177695322	0,000297379	802	250,24	585,43
25	1.300	0,000249517	0,190048211	0,000308064	833	257,19	585,43

## Parâmetros

$t_0 = 0$  horas  
 $\alpha = 1,9$   
 $\beta = 2.950$  horas

## Factor de escala

Incremento = 50

## Custos

Preventiva = 250 €/intervenção  
 Corretiva = 15.325 €/intervenção

## Duração

Preventiva = 2 horas/intervenção  
 Corretiva = 5 horas/intervenção

## Conclusão

### Manutenção preventiva

**350** horas (custo mínimo)  
**2.700** horas (disponibilidade máxima)

# Alternativa: Modo de falha predominante

2º passo: Comparação dos custos das duas alternativas

Considerando os 3 m.f.:  $tp^* = 350$  horas; 1,520 €/hora

Considerando apenas o m.f. predominante:  $tp^* = 350$  horas

Comparação: Um critério ou outro conduz à mesma conclusão  $tp = 350$  horas (indiferente usar um critério ou outro)

## CONCLUSÃO:

Quando um dos m.f. apresenta um MTTF sensivelmente inferior aos restantes, o critério de escolher o m.f. predominante como base de cálculo da periodicidade óptima económica  $tp^*$  é aceitável.

Porém...

## Alternativa: Modos de falha com frequências de falha iguais ou muito semelhantes

Igualando os parâmetros dos m.f. A e B aos do C, obtemos no simulador:

- Periodicidade óptima económica = **200 horas**
- Custo de MPS = **2,614 €/hora**

Incremento =	50			Acréscimo ao custo mínimo (%)
	Missão (t)	Custo (€/hora)	Fiabilidade	
Começando com:	100	3,154	0,995	20,66%
	150	2,730	0,989	4,41%
	<b>200</b>	<b>2,614</b>	0,982	0,00%
	250	2,659	0,973	1,72%
	300	2,788	0,961	6,63%
	350	2,934	0,949	12,21%
	400	3,143	0,935	20,23%
	450	3,369	0,918	28,87%
	500	3,567	0,902	36,44%
	550	3,766	0,884	44,05%

Conclusão = **A periodicidade óptima é 200**



## Alternativa: Modos de falha com frequências de falha muito próximas

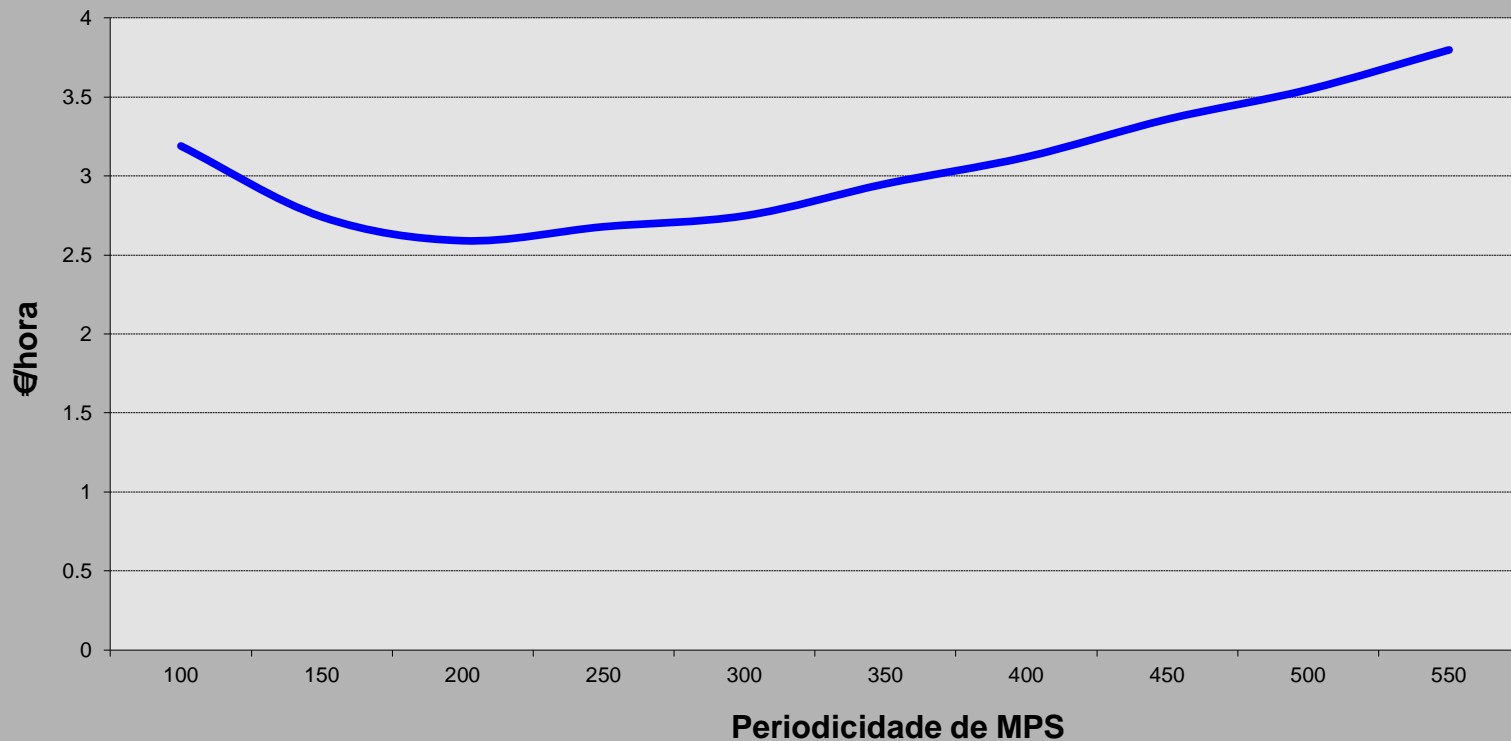
Se tivéssemos adoptado a periodicidade de 350 horas pelo critério do m.f. predominante, obteríamos um custo de 2,934 €/hora, ou seja:  $(2,934 - 2,614) / 2,614 \times 100 \cong 13\%$  superior (não desprezável)

Incremento =	50			Acréscimo ao custo mínimo (%)
	Missão (t)	Custo (€/hora)	Fiabilidade	
Começando com:	100	3,154	0,995	20,66%
	150	2,730	0,989	4,41%
	<b>200</b>	<b>2,614</b>	0,982	0,00%
	250	2,659	0,973	1,72%
	300	2,788	0,961	6,63%
	350	2,934	0,949	12,21%
	400	3,143	0,935	20,23%
	450	3,369	0,918	28,87%
	500	3,567	0,902	36,44%
	550	3,766	0,884	44,05%

Conclusão = A periodicidade óptima é 200

# Alternativa: Modos de falha com frequências de falha muito próximas

**Custo de manutenção em função da periodicidade de MPS**



# Alternativa: Modos de falha com frequências de falha muito próximas


## CONCLUSÃO:

Quando os m.f. de um componente ocorrem com uma frequência muito próxima, o critério de escolher o m.f. predominante como base de cálculo da periodicidade óptima económica conduz a um custo de manutenção superior. Logo, a análise considerando todos os modos de falha é aconselhada.

# Modos de falha em fiabilidade série?

Notar que o componente que falha por vários modos será **substituído por outro novo** sempre que ocorra uma falha, independentemente se foi devido ao modo A, B ou C. Logo **cada m.f. não guarda memória** da sua vida passada como acontece no caso de componentes em série.

	A	B	C
$t_0 =$	0	0	0
$\alpha =$	2,8	3,5	1,9
$\beta =$	3.900	4.100	2.950
$t_p =$	350	350	350
$F(t_p) =$	0,00117	0,000182	0,01727
$MTTR_{CM} =$	5	5	5
$MTTR_{PM} =$	2	2	2



Custo unitário =	604	€/intervenção
Custo unitário =	5,19	€/hora
MTTM =	116	horas
Freq.	0,008588	falhas/hora
MTTF	2,02	horas
	0,9828	

1,52 €/hora

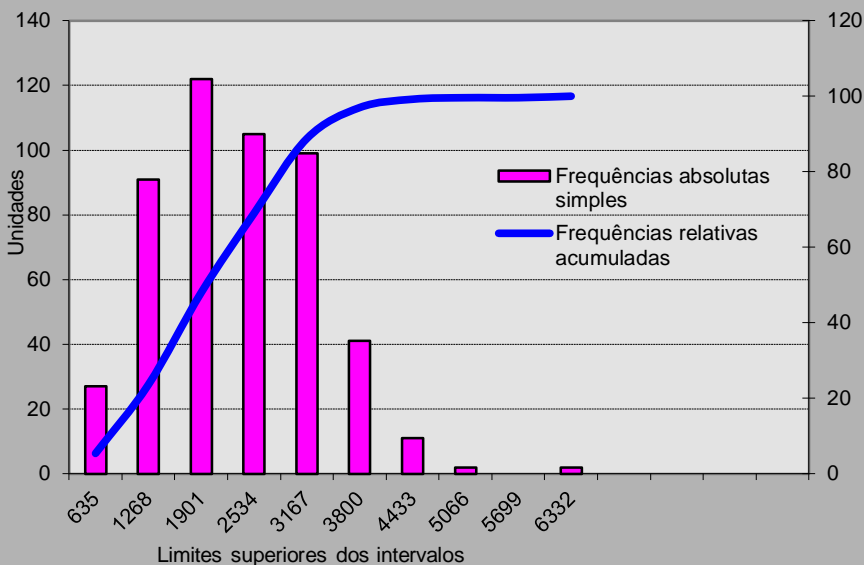
350 horas

Resultados completamente diferentes!

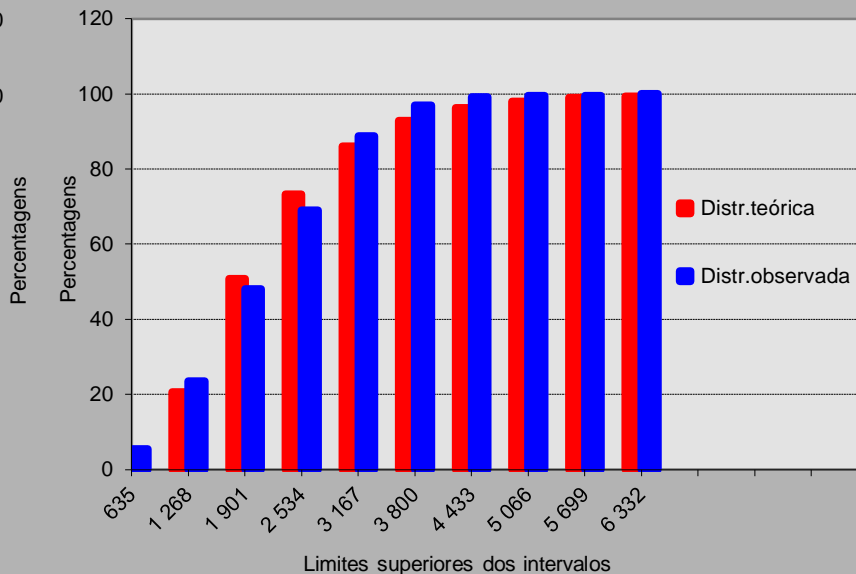
# Modos de falha concorrentes

O resultado do tratamento em frequência dos TTF do conjunto dos 3 m.f. e do teste de aderência de K-S denuncia um comportamento em falha segundo uma distribuição de probabilidade **LogNormal** de parâmetros: **Média  $\cong 7,5$**  e **Desvio padrão  $\cong 0,485$**  para um nível de significância de 5%...

Distribuição em frequência dos dados observados



Teste de aderência de K-S



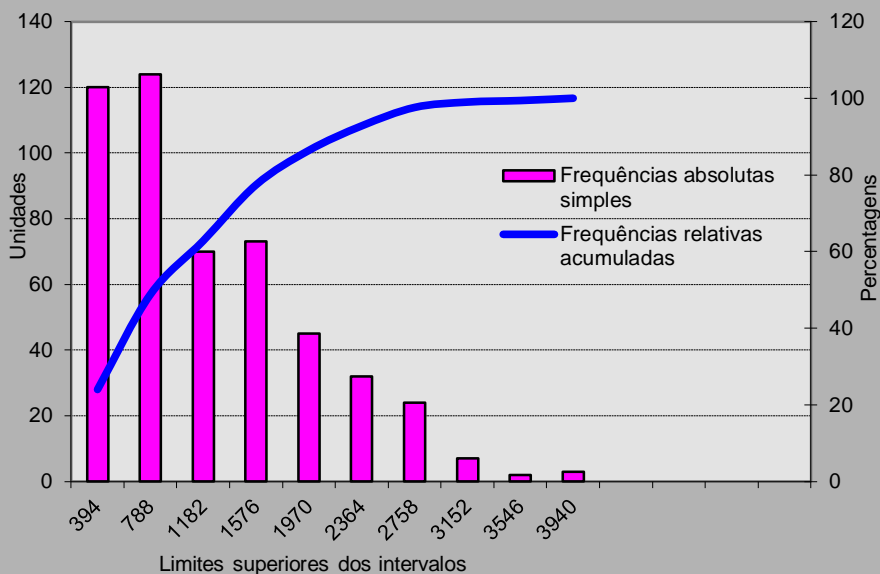
O que comprova a viabilidade de adoção de uma **política de MPS...**



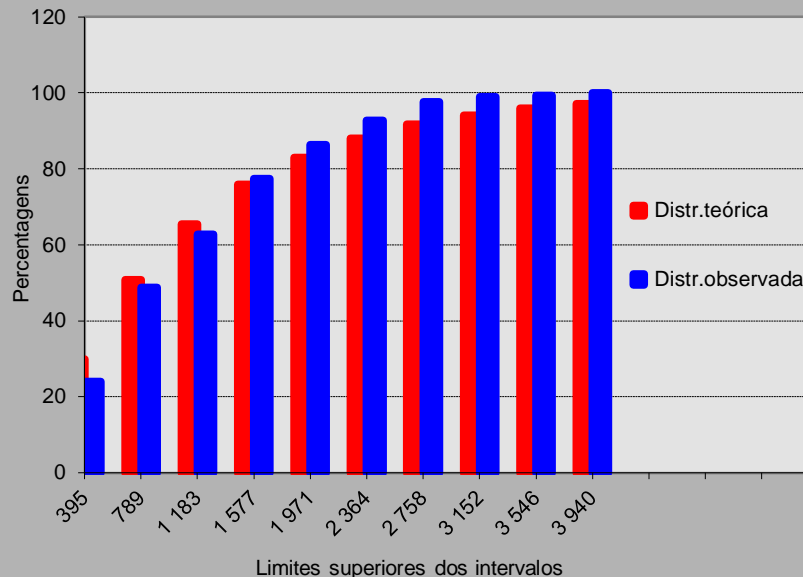
# Modos de falha em fiabilidade série?

...o que não seria viável se considerássemos os m.f. como se fossem componentes em fiabilidade série, pois pelo teste de K-S obteríamos uma distribuição dos TTF segundo uma **Exponencial negativa** (sem memória) de parâmetro  $\lambda$ : **Média  $\cong 0,00085$**  para um nível de significância de 5%, o que, de facto, **não justificaria qualquer política de manutenção preventiva.**

Distribuição em frequência dos dados observados



Teste de aderência de K-S



**Como queríamos demonstrar.**

# Conclusão

**Em resumo:**

**No caso de um componente que pode falhar por vários modos e para o qual não seja técnica e economicamente viável uma política de MPC, a política de MPS pode constituir uma alternativa viável.**

# Jornadas de Manutenção APMI - 2018

## Obrigado pela atenção

Comentários?  
Questões?

**Rui Assis**

**[rassis@rassis.com](mailto:rassis@rassis.com)**

**[www.rassis.com](http://www.rassis.com)**

**João Ribeiro**

**[jprribeiro@gmail.com](mailto:jprribeiro@gmail.com)**

O simulador aqui mostrado estará disponível no *site*  
[www.rassis.com](http://www.rassis.com) a partir de Fevereiro