

# **Periodicidade óptima económica de limpeza do feixe tubular de um permutador de calor**

**Rui Assis**

**Colaboração dos colegas: Helder Soares e Alexandre Rosca**

***APMI***

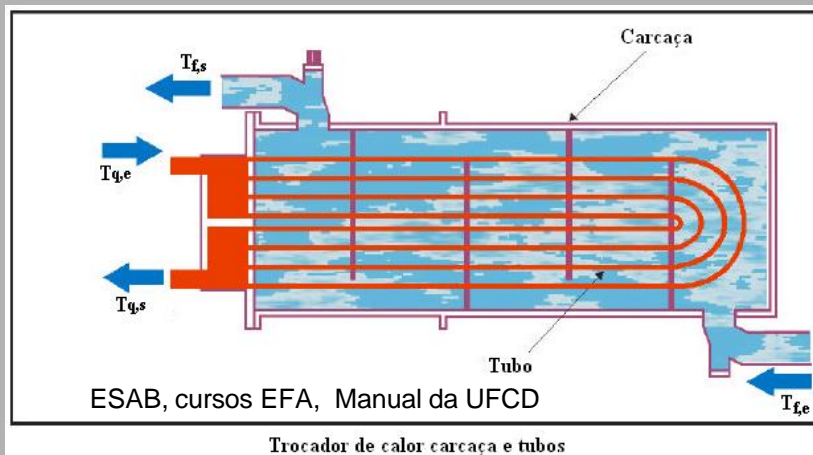
# Objectivos da apresentação

1. Mostrar como definir uma curva ***P-F*** (falha potencial – falha funcional) com base na experiência e apoio do EXCEL;
2. Mostrar como prever o momento para intervenção com base no critério “**probabilidade máxima limite admissível**” de falha ou no critério “**economia máxima operacional**” (Manutenção preditiva).

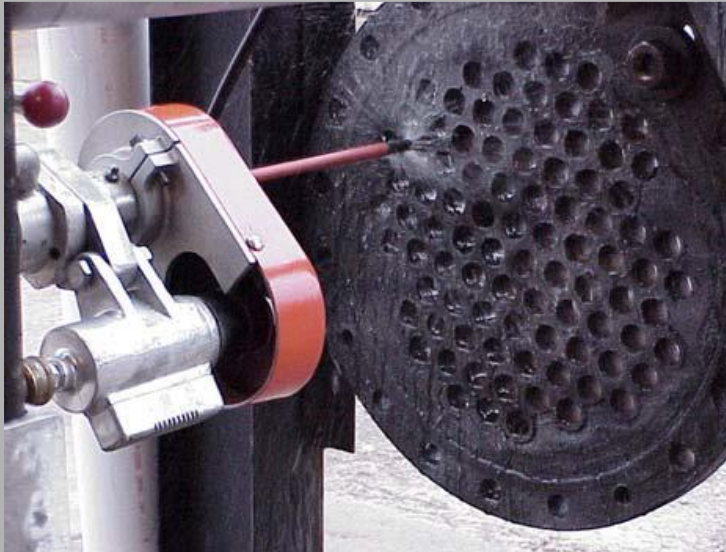
O caso aqui apresentado é um desenvolvimento do Exemplo 5.10 do meu livro: **“Apoio à Decisão em Manutenção na Gestão de Activos Físicos”**, 2ª edição, LIDEL, 2014

O caso aqui apresentado foi **em parte** adaptado da edição 76 da publicação *Reliability Hotwire* com permissão da *Reliasoft Corporation*)

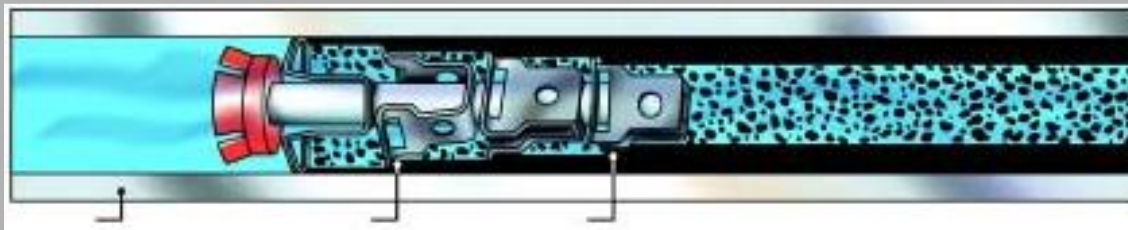
Objecto de estudo: **Permutador de corpo cilíndrico e feixe tubular**



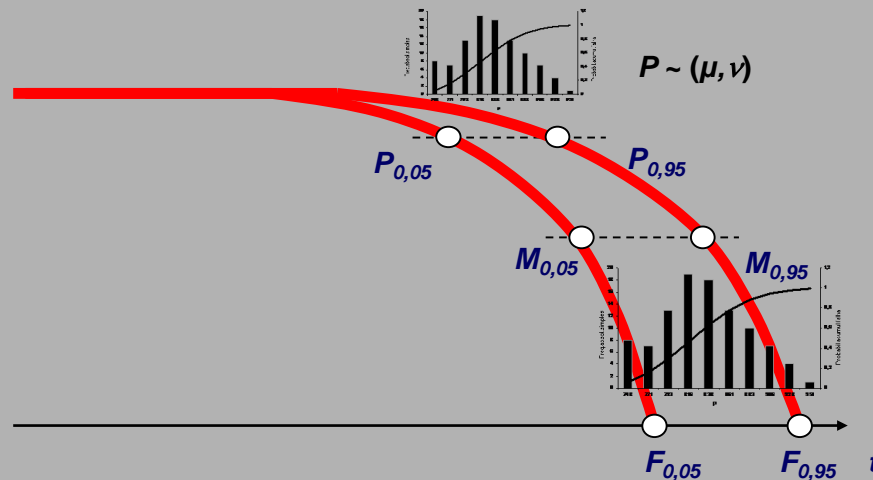
# Limpeza



As incrustações devem ser removidas periodicamente por meios mecânicos.



Numa refinaria, os tubos de um permutador de calor são inspeccionados regularmente para medir a espessura do depósito que se acumula internamente, por meio de raios gama. Um tubo é considerado **falhado** se a espessura do depósito exceder **5 centésimas de polegada** (equivalente ao ponto **F** da curva **P-F**). Considera-se também um sinal de aviso quando a espessura atinge **3,5 centésimas de polegada**. Se a espessura aumentar para além deste limite, é considerado um sinal de falha eminente (equivalente ao ponto **P** da curva **P-F**).



O fluido que é arrefecido passa pelo interior dos tubos e o fluido que arrefece (água, por exemplo) passa pelo exterior. Pretende-se confrontar duas naturezas de custos:

1. **Custo horário de limpeza**, o qual será tanto menor quanto maior for o intervalo de tempo entre cada duas paragens para este efeito;
2. **Custo horário da energia consumida** com a bombagem do fluido arrefecido, custo este que crescerá:
  - Por um lado, com a **perda de carga** originada pelo depósito que vai crescendo no interior dos tubos;
  - Por outro lado, com o **aumento do caudal** necessário para remover a mesma quantidade de calor e compensar assim a diminuição da condutibilidade térmica devida ao depósito que vai crescendo no interior dos tubos.

# Objectivo

Pretendemos determinar a **periodicidade de limpeza** com base:

1. No **critério “probabilidade máxima limite admissível”** de falha (**0,05** por exemplo);
2. No **critério “economia máxima operacional”** (considerando os custos de limpeza e os custos energéticos acrescidos).

# 1º passo: Determinar a função da espessura do depósito ao longo do tempo

Degradation Analysis: Degradation			
A45			
	Inspection Time	Degradation	Unit ID
1	2	0.8	A01
2	6	1.48	A01
3	8	2.32	A01
4	10	2.74	A01
5	12	3.72	A01
6	13.5	5	A01
7	2	0.88	A02
8	6	1.61	A02
9	8	2.19	A02
10	10	3.4	A02
11	12	4.1	A02
12	14	5	A02
13	2	0.76	A03
14	6	1.38	A03
15	8	1.86	A03
16	10	2.54	A03
17	12	3.38	A03
18	14	4.56	A03
19	14.5	5	A03
20	2	0.57	A04
21	6	0.99	A04
22	8	1.24	A04
23	10	1.61	A04
24	12	2.1	A04
25	14	2.73	A04
26	16	3.45	A04
27	18	4.63	A04
28	18.5	5	A04
29	2	0.83	A05
30	6	1.36	A05
31	8	1.64	A05
32	10	2.43	A05
33	12	2.85	A05
34	14	3.65	A05
35	15.7	5	A05

Main | Comments

$y=b*\exp(a*x)$

Model  
Exponential

Critical Degradation  
Y = 3.5

Suspend After  
X = 1000

Edited

Este Quadro mostra na **segunda coluna**, as espessuras medidas em cinco tubos ao longo do tempo, no decorrer de várias inspeções. A **primeira coluna** mostra os momentos de cada inspeção realizada em meses. A **terceira coluna** identifica cada um dos cinco tubos com uma referência.

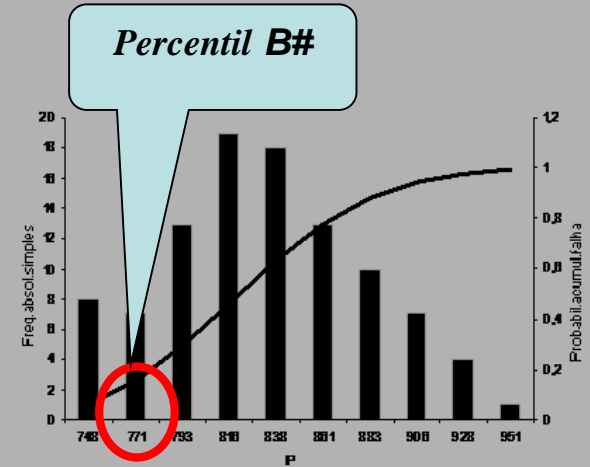
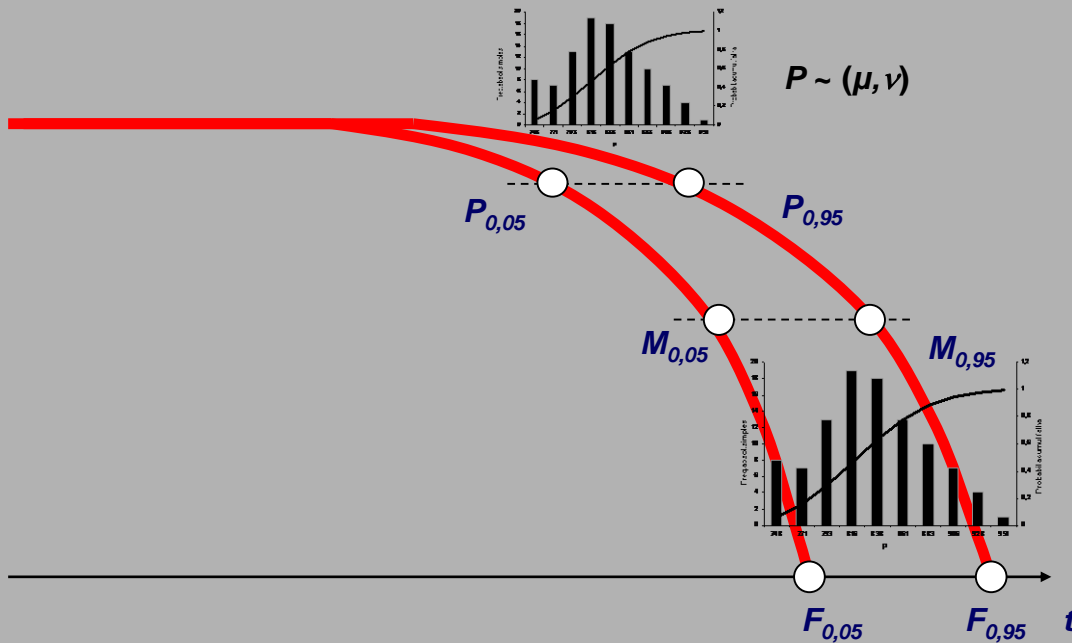
x	A01	A02	A03	A04	A05	
1	2	0,8	0,88	0,76	0,57	0,83
2	6	1,48	1,61	1,38	0,99	1,36
3	8	2,32	2,19	1,86	1,24	1,64
4	10	2,74	3,4	2,54	1,61	2,43
5	12	3,72	4,1	3,38	2,1	2,85
6	13,5	5				
7	14		5	4,56	2,73	3,65
8	14,5			5		
9	15,7					5
10	16				3,45	
11	18				4,63	
12	18,5				5	



# 1º passo: Determinar a função da espessura do depósito ao longo do tempo

## Intervalos de tempo $P-F$ e $M-F$

$P, M$  e  $F$  variam aleatoriamente



$(P_t - F_t) \sim (\mu, \nu)$

$F \sim (\mu, \nu)$

- $(P_t - F_t)$  é também uma variável aleatória
- Seleccionar o percentil **B#**

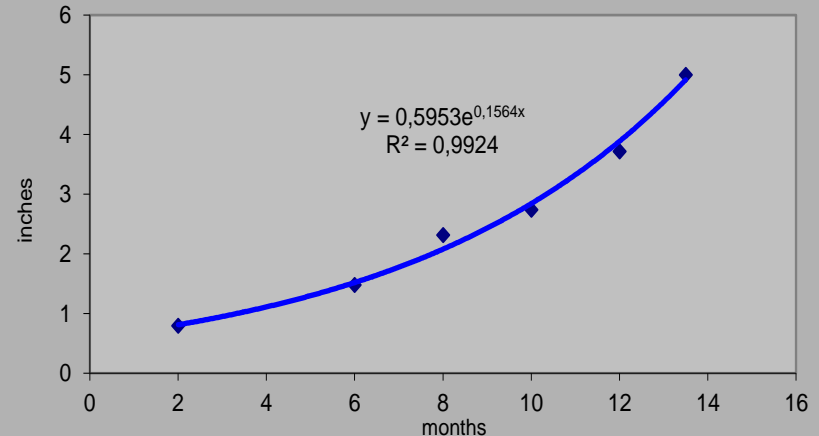
# 1º passo: Determinar a função da espessura do depósito ao longo do tempo

Para cada um dos pontos de medição da espessura do depósito...

	x	A01	A02	A03	A04	A05
1	2	0,8	0,88	0,76	0,57	0,83
2	6	1,48	1,61	1,38	0,99	1,36
3	8	2,32	2,19	1,86	1,24	1,64
4	10	2,74	3,4	2,54	1,61	2,43
5	12	3,72	4,1	3,38	2,1	2,85
6	13,5	5				
7	14		5	4,56	2,73	3,65
8	14,5			5		
9	15,7					5
10	16				3,45	
11	18				4,63	
12	18,5				5	

...ve a evolução da espessura do depósito ao longo do tempo no caso do tubo A01:

Unidade A01			P = 3,5 polegadas
			F = 5 polegadas
y = 0,5953.e <sup>0,1564x</sup>			
0,59526398 0,15639004			
x	y	Taxa	ln(y) = ln(0,5953) + 0,1564*x
2	0,8	-	
6	1,48	0,17	x = P = 11,33 meses
8	2,32	0,42	x = F = 13,61 meses
10	2,74	0,21	
12	3,72	0,49	
13,5	5	0,85333333	FDT = 0,83
			Intervalo P-F = 2,28



Os valores dos pontos **P** e **F** foram calculados por **regressão não linear** recorrendo ao “**Add-Trendline**” do EXCEL.

# 1º passo: Determinar a função da espessura do depósito ao longo do tempo

Repetindo a mesma análise para cada um dos restantes 4 tubos, obtemos para o conjunto:

x	A01	A02	A03	A04	A05
2	0,8	0,88	0,76	0,57	0,83
6	1,48	1,61	1,38	0,99	1,36
8	2,32	2,19	1,86	1,24	1,64
10	2,74	3,4	2,54	1,61	2,43
12	3,72	4,1	3,38	2,1	2,85
13,5	5				
14		5	4,56	2,73	3,65
14,5			5		
15,7					5
16				3,45	
18				4,63	
18,5				5	

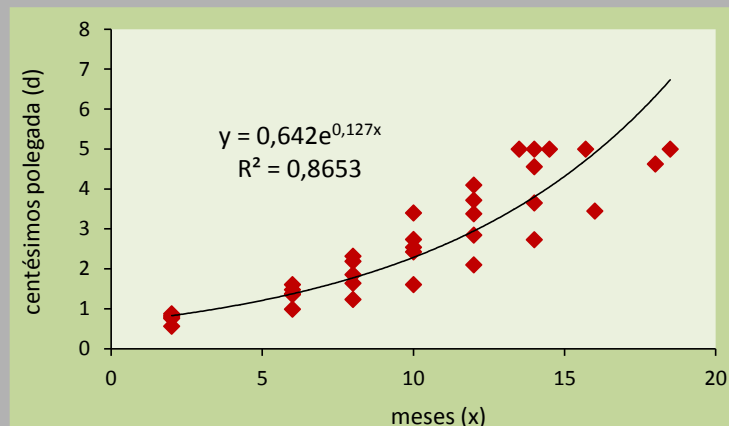
$$d = 3,5 \cdot 10^{-2} \text{ polegadas}$$

$$a = -0,44312371 \quad 0,642027775$$

$$b = 0,127041064$$

$$x = P = 13,35 \text{ meses}$$

Ponto P = 13,35 meses



## 2º passo: Determinar o valor de $P$ para um percentil de 0,05

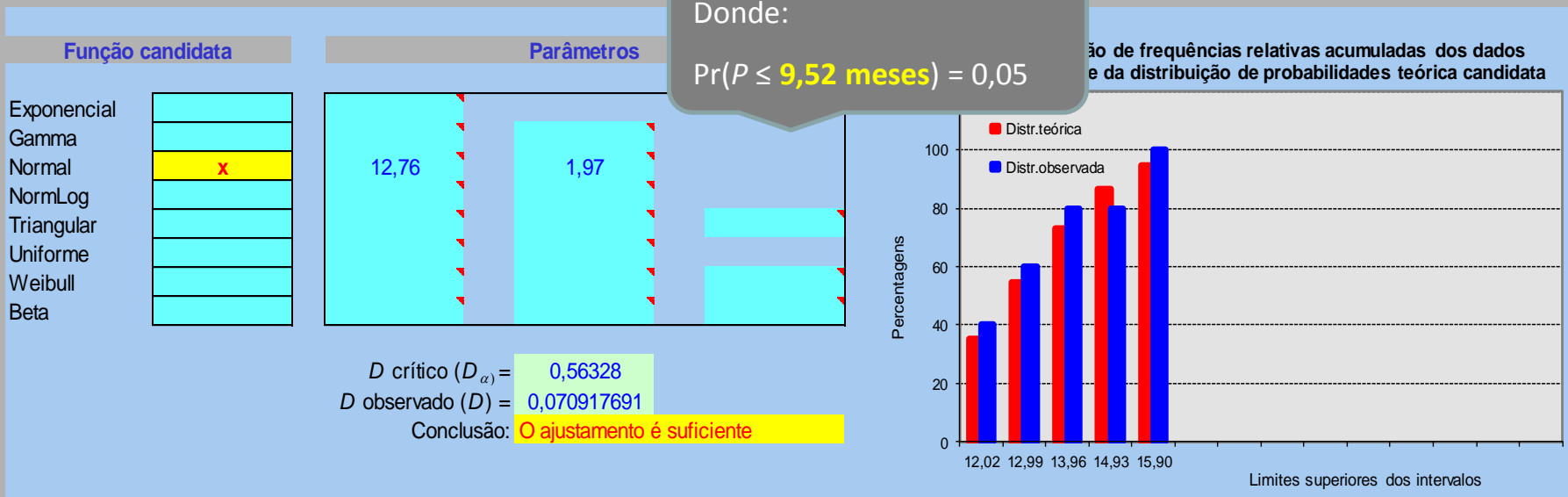
Se tratarmos em frequência os valores de  $P$  e de  $F$  calculados para os 5 tubos, obtemos:

P médio =	12,76	DP de P =	1,97
F médio =	15,27	DP de F =	2,16

Se testarmos a aderência dos 5 pontos  $P$  a uma distribuição de probabilidade **Normal** usando, por exemplo, o teste de **KS**, obtemos:

Donde:

$$\Pr(P \leq 9,52 \text{ meses}) = 0,05$$

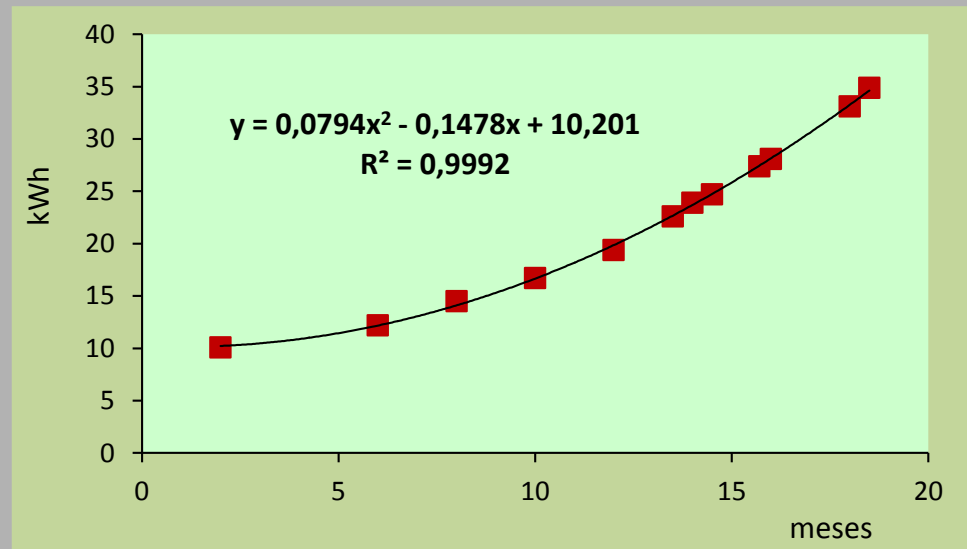


### 3º passo: Determinar a função do consumo energético do motor da bomba de circulação ao longo do tempo

Os **consumos energéticos** foram medidos no quadro de alimentação da bomba de circulação do fluido pelo interior dos tubos, de onde resultou:

Meses	Energia (kWh)
2	10,1
6	12,2
8	14,5
10	16,7
12	19,4
13,5	22,6
14	23,9
14,5	24,7
15,7	27,4
16	28,1
18	33,1
18,5	34,9

E uma **análise de regressão** permitiu encontrar a função do consumo energético ao longo do tempo:



## 5º passo: Determinar o custo do acréscimo de energia consumida em função da periodicidade de limpeza

Custo de uma operação de limpeza:  $L = 5000 \text{ €}$

Consumo energético base:  $W_0 = 10 \text{ kWh}$

Preço de 1 kWh:  $p_v = 0,15 \text{ €/kWh}$

Taxa de actualização ( $i$ ) = **15%** ano ou  $(1 + 0,15)^{(1/12)} - 1 = 1,1715\%$  mês

Periodicidade óptima de limpeza:  $m^*$

### Solução pelo método analítico:

$$CT = L \cdot (A/F; m; i) + \left[ \sum_{n=1}^m (24) \cdot (30) \cdot \frac{(W_n - W_{n-1})}{2} p_v \cdot (P/F; n; i) \right] \cdot (A/P; m; i)$$

$$CT = L \cdot \left[ \frac{i}{(1+i)^m - 1} \right] + \left[ \sum_{n=1}^m (24) \cdot (30) \cdot \frac{(W_n - W_{n-1})}{2} p_v \cdot (1+i)^{-n} \right] \cdot \left[ \frac{i \cdot (1+i)^m}{(1+i)^m - 1} \right]$$

$$\frac{dCT}{dm} = 0 \rightarrow m^*$$

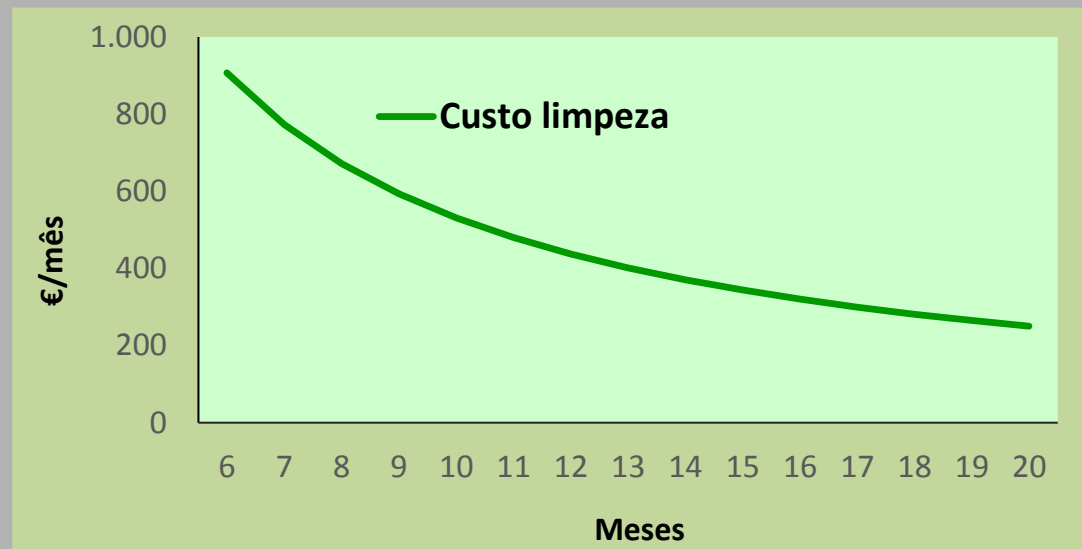
**24** – 24 horas/dia

**30** – 30 dias/mês

## 4º passo: Determinar o custo da limpeza dos tubos em função da sua periodicidade

Solução pelo **método numérico (custo total)**:

Meses	Limpeza
	Custo médio periódico (€/mês)
1	5.600
2	2.784
3	1.845
4	1.376
5	1.094
6	906
7	772
8	672
9	594
10	531
11	480
12	437
13	401
14	370
15	344
16	320
17	300
18	281
19	265
20	250



## 5º passo: Determinar o custo do acréscimo de energia consumida em função da periodicidade de limpeza

### Solução pelo método numérico (custo total):

Meses	Energia (acrécimo)					
	kWh medidos	kWh acréscimo	kWh acréscimo médio no mês	Custo do acréscimo no mês (€)	Custo do acréscimo actualizado (€)	Custo periódico (€/mês)
1	10,13	0,13	0,07	7,15	7,07	7
2	10,22	0,22	0,18	19,18	18,74	13
3	10,47	0,47	0,35	37,51	36,22	21
4	10,88	0,88				
5	11,45	1,45				
6	12,17	2,17				
7	13,06	3,06				
8	14,10	4,10				
9	15,30	5,30				
10	16,66	6,66				
<b>11</b>	18,18	8,18				
12	19,86	9,86				
13	21,69	11,69				
14	23,69	13,69				
15	25,84	15,84				
16	28,15	18,15				
17	30,63	20,63				
18	33,26	23,26	21,94	2369,66	1921,49	762
19	36,05	26,05	24,65	2662,29	2133,78	851
20	38,99	28,99	27,52	2972,05	2354,47	946

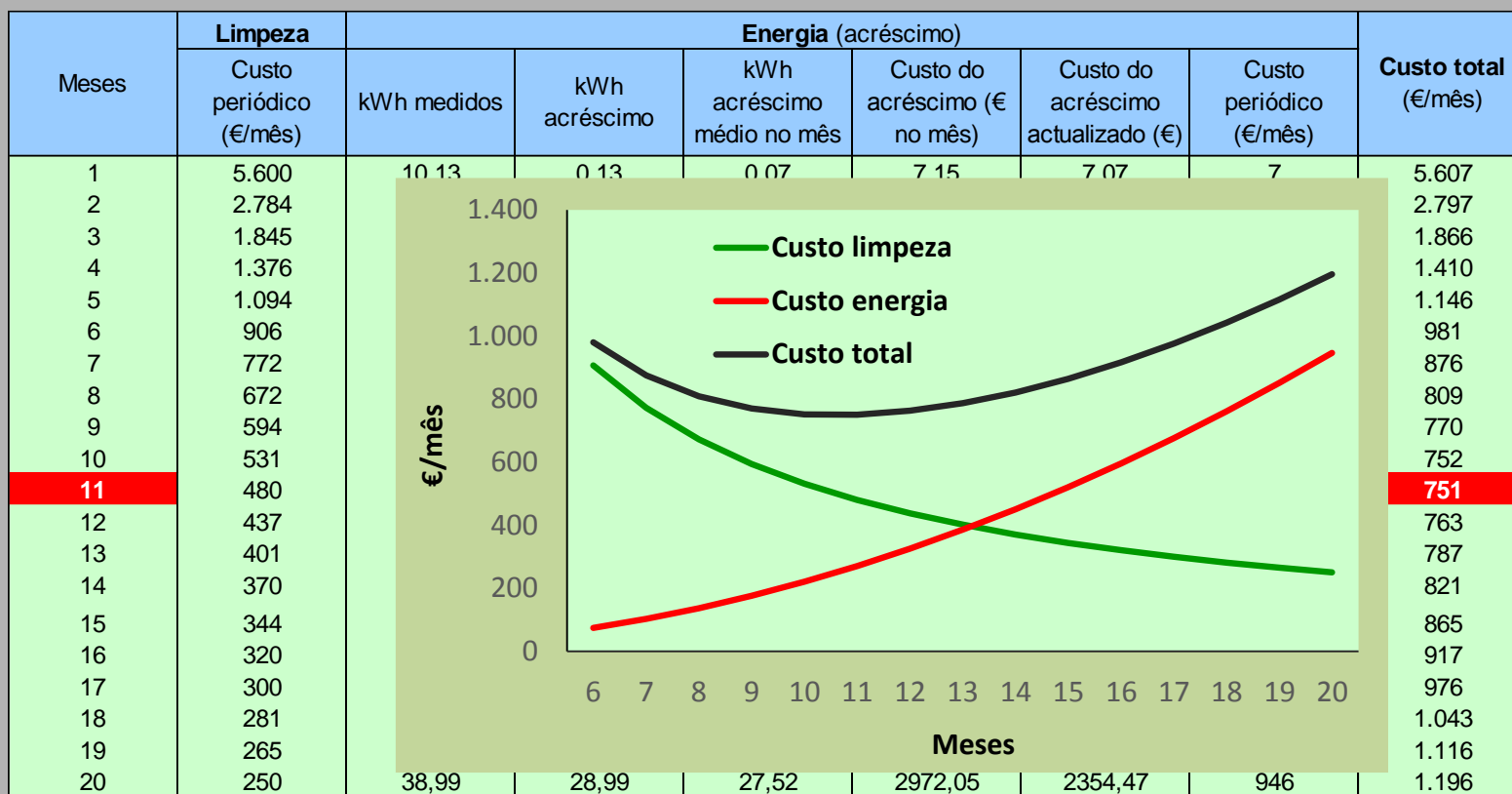




## 6º passo: Determinar o custo total (soma dos custos anteriores)

Solução pelo método numérico (custo total):

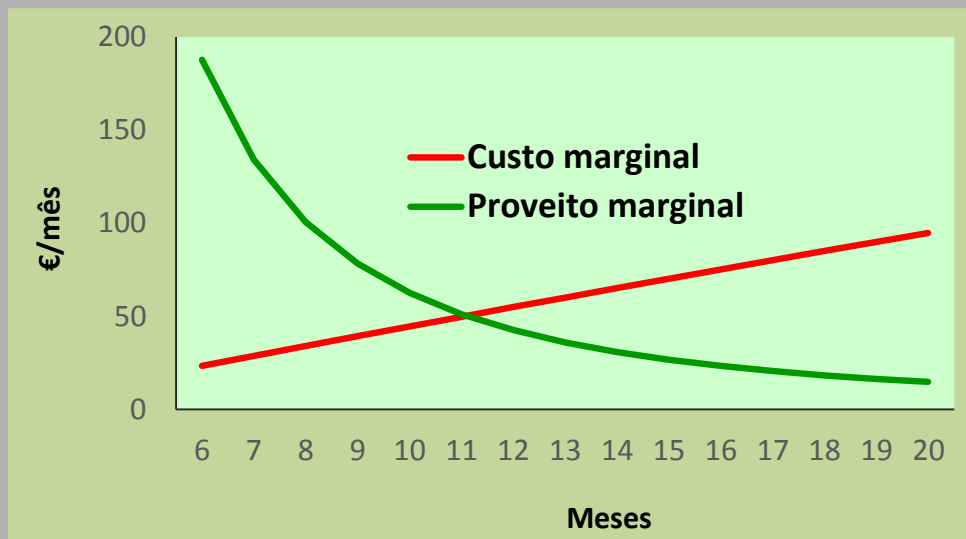
Custo mínimo = 751 €/mês  
 Periodicidade óptima = 11 meses



## Alternativa ao 6º passo: Determinar o custo marginal e o proveito marginal

Solução pelo método numérico (custos marginais):

Meses	Custo marginal (energia) (€/mês)	Proveito marginal (limpeza) (€/mês)
1	-	-
2	6	2.816
3	8	939
4	13	469
5	18	282
6	23	188
7	29	134
8	34	101
9	39	78
10	44	63
<b>11</b>	<b>50</b>	<b>51</b>
12	55	43
13	60	36
14	65	31
15	70	27
16	75	23
17	80	21
18	85	18
19	90	16
20	95	15



## Referências pessoais

- Último livro “**Apoio à Decisão em Manutenção na Gestão de Activos Físicos**”, 2ª edição, LIDEL, 2014  
[http://www.rassis.com/livro\\_ADMGAF.html](http://www.rassis.com/livro_ADMGAF.html)
- Penúltimo livro “**EXCEL na Simulação de Sistemas e Análise de Risco**”, Edição de autor, AMAZON, 2014  
[http://www.rassis.com/livro\\_SSAR.html](http://www.rassis.com/livro_SSAR.html)
- Cursos de Gestão em Engenharia  
[http://www.rassis.com/Cursos/Cursos\\_RA-ISQ\\_2015-6.pdf](http://www.rassis.com/Cursos/Cursos_RA-ISQ_2015-6.pdf)
- Website pessoal [www.rassis.com](http://www.rassis.com)
- Email: [rassis@rassis.com](mailto:rassis@rassis.com)

**OBRIGADO**