

SECÇÃO ÓTIMA



1. Introdução

Nem sempre a secção definida ou tabelada como “mínima” para uma determinada corrente de serviço é a secção ótima para executar um circuito. Esta secção dependerá do valor da carga e da quantidade de tempo a que está sujeita, podendo compensar economicamente executar o circuito com uma secção superior, obtendo-se o retorno do investimento com a redução das perdas por efeito de Joule.

2. Secção ótima de um circuito monofásico

Ponderar se compensa executar um circuito com uma secção superior à estipulada ou à mínima tabelada, passa por relacionar o investimento acrescido numa secção superior com o eventual ganho em eficiência que se alcançará. Para tal, ter-se-á que contar com o custo dos condutores e sobretudo estimar a eficiência do circuito a alimentar considerando as duas secções em ponderação. Esta relação de custo com eficiência irá permitir calcular o retorno do investimento em número de anos, ou seja, o tempo que levará a pagar o investimento acrescido realizado.

O retorno do investimento para um circuito monofásico, o chamado *Payback*, é dado pela expressão seguinte:

$$Payback_{anos} = \frac{\text{Investimento adicional em condutores}}{\text{Poupança adicional em Perdas}}$$

Em que:

- O “Investimento adicional em condutores” representa o encargo acrescido para se executar o circuito com uma secção superior;
- A “Poupança adicional em perdas” representa a poupança em perdas por efeito de Joule por ano, valorizadas ao preço do kWh, por se optar por condutores de secção superior, logo com menos perdas”.

Assim, o *Payback* em anos poderá ser obtido da seguinte forma:

$$Payback_{anos} = \frac{\text{Custo Circuito}_2 - \text{Custo Circuito}_1}{(\text{Perdas}_{\text{circuito1/ano}} - \text{Perdas}_{\text{circuito2/ano}}) * \text{Preço kWh}}$$

Considerando que as perdas por efeito de Joule são dadas pela expressão:

$$P = R * I^2 \quad \text{sendo} \quad R = \frac{\rho * L}{S}$$

A expressão do *Payback* poderá ser obtida da seguinte forma:

$$Payback_{anos} = \frac{Custo_{Circuito2} - Custo_{Circuito1}}{2 * I^2 * \rho * L * \left(\frac{1}{S_1} - \frac{1}{S_2}\right) * \frac{1}{1000} * h * 365 * Preço_{kWh}}$$

Em que, relativamente ao numerador:

- O custo do circuito X contempla o custo dos 3 condutores: fase, neutro e terra, para as secções em comparação (S_1 é a secção mínima e S_2 a secção a ponderar).

Relativamente ao denominador:

- O primeiro “2” refere-se às perdas em 2 condutores, de fase e neutro;
- “ I^2 ” representa a corrente que percorre o circuito ao quadrado;
- “ ρ ” a resistividade à temperatura de serviço;
- “L” o comprimento do circuito;
- “ S_1 ” e “ S_2 ” são as secções dos condutores em comparação;
- “h” as horas de utilização diárias, ou as horas em carga.

Veja-se, a título de exemplo, um circuito monofásico com uma carga resistiva pura:

$$\cos\phi \approx 1 \Rightarrow S \approx P = 2000W ; U = 230V ; L = 15m$$

A potência do circuito é uma variável importante, pois é esta que irá definir a corrente que percorrerá os condutores, estando diretamente relacionada com as perdas por efeito de Joule.

$$I = \frac{P}{U} = \frac{2000}{230} = 8,7A$$

Para a corrente e comprimento em causa e de acordo com as tabelas da corrente máxima admissível dos condutores nos vários modos de instalação (RTIEBT), a secção de 2,5mm² será suficiente para alimentar uma carga de 2000W.

A questão é:

Será que compensará, economicamente, optar por um condutor de 4mm², ou apenas em algumas condições se torna vantajoso optar por esta secção?

$$Resistência\ do\ condutor\ 2,5\ mm^2 \Rightarrow R = \frac{\rho L}{S} = 0,135\Omega$$

$$Resistência\ do\ condutor\ 4\ mm^2 \Rightarrow R = \frac{\rho L}{S} = 0,084\Omega$$

As perdas por efeito de Joule instantâneas serão, por condutor:

$$Perdas_{Condutor1} = R_{C1} * I^2 = 10,22W$$

$$Perdas_{Condutor2} = R_{C2} * I^2 = 6,36W$$

Sendo o circuito monofásico, a corrente no condutor neutro é igual à corrente no condutor de fase, ou seja, as perdas por efeito de Joule são iguais em ambos os condutores, conseqüentemente o conjunto das perdas no circuito será o dobro das verificadas no condutor de fase:

$$Perdas_{C1} = 2 * R_{C1} * I^2 = 20,44W$$

$$Perdas_{C2} = 2 * R_{C2} * I^2 = 12,72W$$

A tabela 1 faz um resumo do anteriormente referido.

Tabela 1 – Resumo das perdas nos condutores

	Resistência do condutor	Perdas no condutor	Perdas no circuito
Circuito 1 Condutor 2,5mm ²	0,135 Ω	10,22 W	20,44 W
Circuito 2 Condutor 4mm ²	0,084 Ω	6,36 W	12,72 W

Por cada período de 1 hora de utilização do circuito, as perdas por efeito de Joule serão:

$$Perdas_{C1} = 2 * R_{C1} * I^2 = 20,44Wh$$

$$Perdas_{C2} = 2 * R_{C2} * I^2 = 12,72Wh$$

Se se considerar uma utilização de uma hora diária, durante um ano (365 horas) as perdas acumuladas serão respetivamente de:

$$Perdas_{C1} = 20,44Wh * 365dias = 7,77kWh$$

$$Perdas_{C2} = 12,72Wh * 365dias = 4,64kWh$$

Supondo que a utilização é intensiva, por exemplo, num comércio ou numa indústria em que a utilização é muito superior podendo atingir 8 horas por dia em carga, as perdas acumuladas anualmente serão nesta situação:

$$Perdas_{C1} = 20,44Wh * 365dias * 8horas = 62,16kWh$$

$$Perdas_{C2} = 12,72Wh * 365dias * 8horas = 37,12kWh$$

A tabela 2 faz um resumo do anteriormente referido.

Tabela 2 – Perdas nos condutores para as diversas situações de utilização dos circuitos

	1 Hora	8 Horas	1 Hora por dia por ano	8 Horas por dia por ano
Perdas C1	20,44Wh	163,52Wh	7,77kWh	62,16kWh
Perdas C2	12,72Wh	101,76Wh	4,64kWh	37,12kWh

Considerando o preço por kWh da tarifa regulada em 2013 de 0,14€/kWh (sem IVA) o custo em perdas é, para as várias situações, o indicado na tabela 3:

Tabela 3 – Custos das perdas nos condutores para as diversas situações de utilização dos circuitos

	1 Hora por dia por ano	8 Horas por dia por ano	1 Hora por dia durante 10 anos	8 Horas por dia durante 10 anos
Perdas C1	1,04€	8,35€	10,43€	83,46€
Perdas C2	0,62€	5,22€	4,35€	52,16€

Então, do ponto de vista económico, em que situações compensará executar o circuito com condutores de 2,5mm² ou de 4mm² de secção?

Considerando um custo médio dos condutores (sem IVA), conforme indicado na tabela 4:

Tabela 4 – Custo médio dos condutores (sem IVA)

	1 metro de condutor	15 metros de condutor	15 metros 3 condutores
Condutor 2,5 mm ²	0,36€	5,4€	16,2€
Condutor 4 mm ²	0,56€	8,4€	25,2€

O “custo dos condutores” deverá ser o custo para o cliente final, pois é este que terá de compensar o investimento adicional com a poupança nas perdas por efeito de Joule.

Sendo o cálculo do *Payback* dado pela expressão:

$$Payback_{anos} = \frac{Custo\ Circuito_2 - Custo\ Circuito_1}{(Perdas_{circuito1ano} - Perdas_{circuito2ano}) * Preço\ kWh}$$

Aplicado ao exemplo em análise, executar o circuito com condutores de 2,5mm² terá um custo inicial de 16,2€ e executar o circuito com condutores de 4mm² terá um custo de 25,2€.

$$Payback_{1h\ dia} = \frac{Investimento\ adicional\ em\ condutores}{Poupança\ adicional\ em\ Perdas} = \frac{25,2 - 16,2}{1,04 - 0,62} = 21,43\ Anos$$

$$Payback_{8h\ dia} = \frac{Investimento\ adicional\ em\ condutores}{Poupança\ adicional\ em\ Perdas} = \frac{25,2 - 16,2}{8,35 - 5,22} = 2,88\ Anos$$

Conclui-se assim que, se se considerar uma utilização diária de uma hora durante 365 dias, a secção ótima será a secção mínima tabelada 2,5mm²; no entanto, se o circuito tiver uma utilização intensiva, tomando por exemplo as 8 horas por dia, a secção ótima é 4mm² e não a mínima regulamentar.

Payback em anos

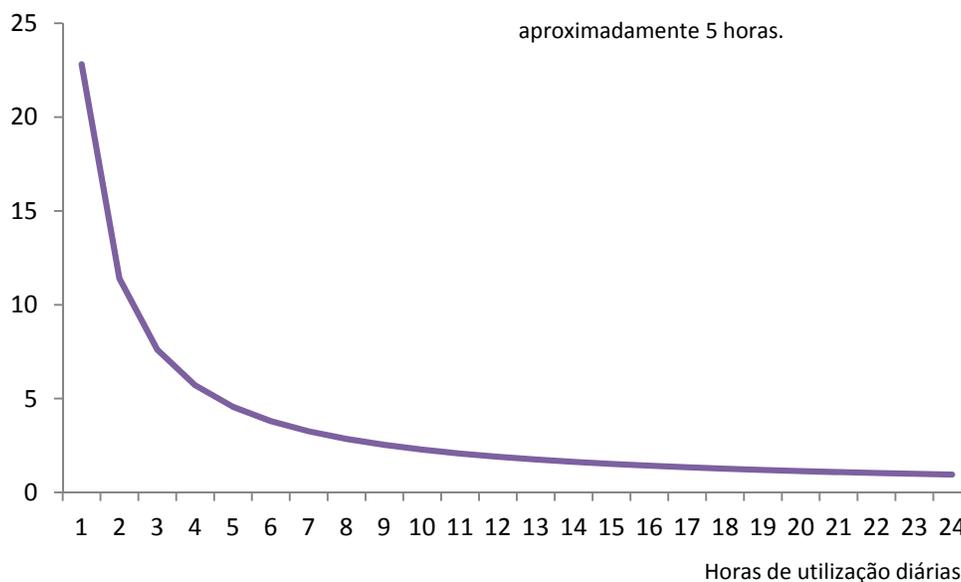


Gráfico 1 – *Payback* do investimento em função da utilização diária

Nota: Duas das variáveis dependem de “custos”, o Custo do Circuito e o Custo do kWh, se ambas forem variando anualmente com base na inflação, não terá impacto no *Payback* do investimento.

No entanto, se se verificar o que tem acontecido nos últimos anos, ou seja, o preço da energia tem tido uma subida superior à inflação, significa que a energia vai ficando mais cara relativamente ao custo dos condutores, existindo assim uma grande probabilidade do *Payback* em anos vir a ser menor do que o inicialmente estimado.

O gráfico 1 mostra o *Payback* do investimento em função da utilização diária.

Analisando o gráfico, considerando uma carga com uma potência de 2000W, se se pretender “oferecer” um *Payback* de 10 anos, seria necessária uma utilização de aproximadamente 2 horas e meia diárias. Já para um *Payback* de 5 anos, implicaria uma utilização diária de aproximadamente 5 horas.

Se se pretender “oferecer” um *Payback* em função das horas de utilização diárias necessárias e da potência do circuito, estas poderão ser calculadas da seguinte forma:

$$horas / dia = \frac{Custo Circuito_2 - Custo Circuito_1}{Payback_{anos} * \left(\frac{P}{U}\right)^2 * 2 * \rho * L * \left(\frac{1}{S_1} - \frac{1}{S_2}\right) * \frac{1}{1000} * 365 * Preço kWh}$$

Se o resultado da quantidade de horas de utilização diárias necessária for:

- Superior a 24 horas diárias, significa que será impossível alcançar o *Payback* desejado;
- Inferior a 24 horas diárias, mas superior à utilização expectável, o *Payback* desejado não será alcançado;
- Igual às horas de utilização expectáveis, o *Payback* desejado será alcançado no tempo desejado;
- Inferior a 24 horas diárias e inferior à utilização expectável, o *Payback* desejado será alcançado antes do tempo desejado.

Relativamente à influência que as restantes variáveis têm sobre o *Payback* do investimento:

- Quanto mais baixo for o custo dos condutores, menor será a quantidades de horas de utilização diária necessária;
- Quanto maior for a Potência P do circuito, menos horas de utilização diária serão necessárias;
- Quanto maior for o comprimento L, maiores serão as perdas nos condutores, pelo que serão necessárias menos horas de utilização diária;
- Quanto maior for o preço do kWh, menos horas de utilização diária serão necessárias.

A tabela 5 faz um resumo do anteriormente referido.

Tabela 5– *Payback* em função das horas de utilização

Horas de utilização h	h > 24	24 > h > 0 e h > expectável	24 > h > 0 e h = expectável	24 > h > 0 e h < expectável
O <i>Payback</i> será	Impossível	Impossível	Alcançado	Superado

A título de exemplo, se se considerar uma utilização diária de 8 horas, o *Payback* em função da potência do circuito é o indicado no gráfico 2.

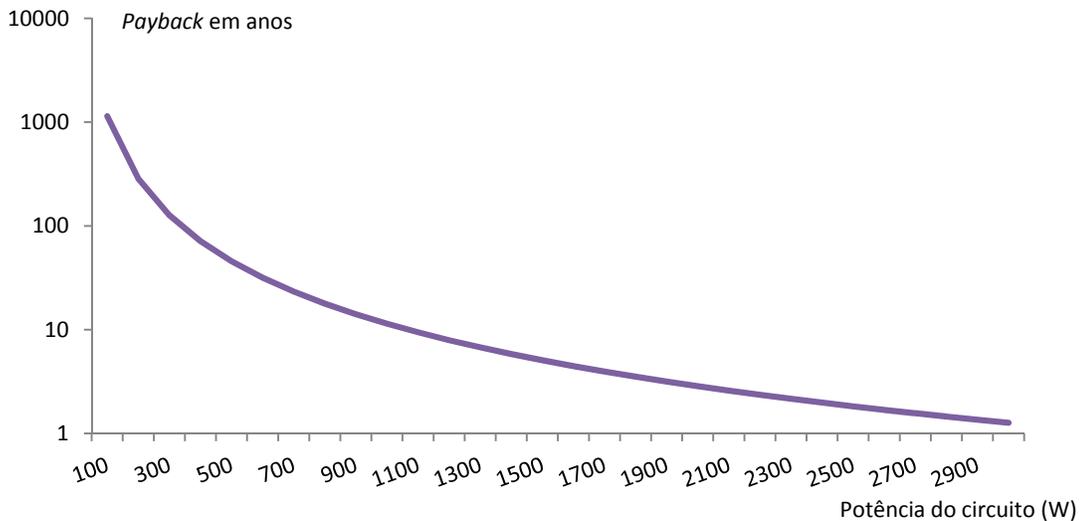


Gráfico 2 – *Payback* do investimento em função da potência do circuito

Ou seja, se se considerar 10 anos como um *Payback* aceitável, só a partir de uma potência de 1200W é que compensaria executar o circuito com uma secção superior.

combinações “Horas de utilização Vs Potência do circuito” que justificariam o investimento e a área a vermelho, as combinações que não compensariam o investimento.

Por fim, se se considerar o *Payback* de 10 anos como “aceitável”, a área a verde, da figura 1, representa as

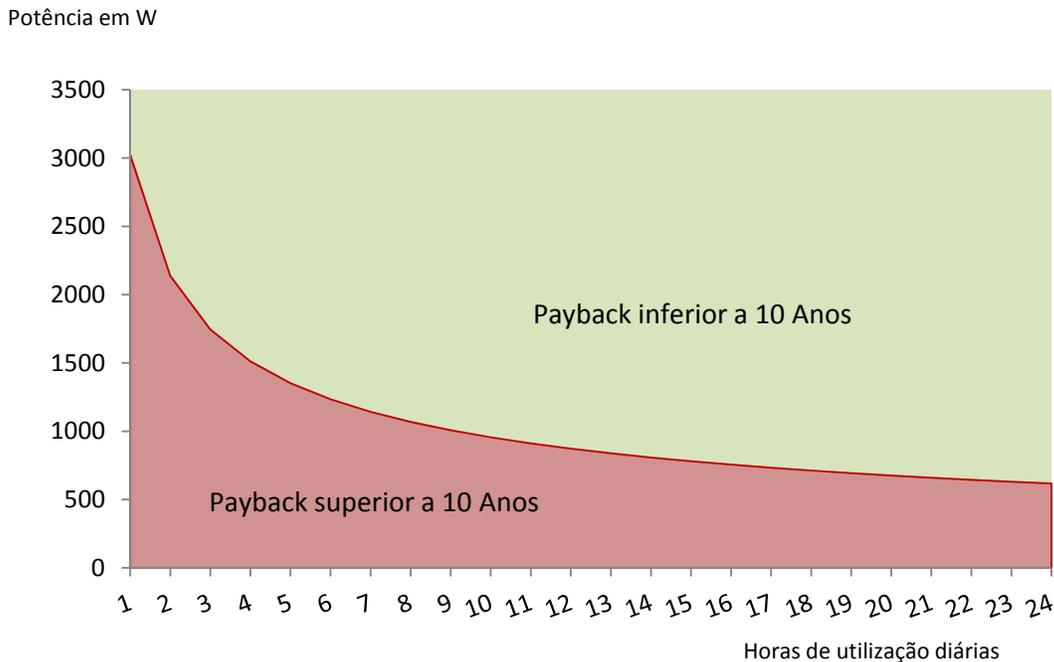


Figura 1 – *Payback* do investimento em função da potência e das horas diárias de utilização

Simplificação do cálculo:

$$Payback_{anos} = \frac{Custo\ Circuito_2 - Custo\ Circuito_1}{2 * \left(\frac{P}{U}\right)^2 * \rho * L * \left(\frac{1}{S_1} - \frac{1}{S_2}\right) * \frac{1}{1000} * h * ds * 52 * Preço\ kWh} \Leftrightarrow$$

$$Payback_{anos} = \frac{3 * L * (Custo\ por\ metro_2 - Custo\ por\ metro_1)}{2 * (I)^2 * L * (R_{1/metro} - R_{2/metro}) * \frac{52}{1000} * h * ds * Preço\ kWh} \Leftrightarrow$$

$$Payback_{anos} = \frac{3 * (Custo\ por\ metro_2 - Custo\ por\ metro_1)}{2 * (I)^2 * (R_{1/metro} - R_{2/metro}) * \frac{52}{1000} * h * ds * Preço\ kWh} \Leftrightarrow$$

A fórmula simplificada para o cálculo do *Payback* em monofásico será então:

$$Payback_{anos} = \frac{28,85 * (Custo\ por\ metro_2 - Custo\ por\ metro_1)}{(I)^2 * (R_{1/metro} - R_{2/metro}) * h * ds * Preço\ kWh}$$

Para se obter o *Payback* em anos, dever-se-á inserir o “Custo por metro” de cada um dos condutores (onde o índice 1 é a secção mínima e o índice 2 a secção a ponderar), a corrente “I” (em função da potência da carga a alimentar), as horas de utilização diárias previsíveis “h”, os dias de utilização semanais “ds” (de 1 a 7) e o “Preço por kWh”.

A resistência por metro de condutor a utilizar na expressão anterior é a indicada na tabela 5, tendo sido considerada a resistividade à temperatura de serviço.

3. Conclusões

A secção ótima de um circuito dependerá não só da corrente de serviço desse circuito e da corrente máxima admissível dos condutores, mas também da utilização em horas que lhe será dada.

Em situações onde existe uma “utilização intensiva” de um circuito, a opção por uma secção “ótima” em vez da secção “mínima tabelada” permite, não só um retorno rápido do investimento, mas também, após esse retorno, uma receita contínua através da poupança em perdas por efeito de Joule.

Tabela 5 – Resistência por metro de condutor

Secção em mm ²	Resistência por metro em Cobre	Resistência por metro em Alumínio
1,5	0,01500	-
2,5	0,00900	-
4	0,00563	-
6	0,00375	-
10	0,00225	-
16	0,00141	0,00225
25	0,00090	0,00144
35	0,00064	0,00103
50	0,00045	0,00072
70	0,00032	0,00051
95	0,00024	0,00038
120	0,00019	0,00030
150	0,00015	0,00024
185	0,00012	0,00019
240	0,00009	0,00015
300	0,00008	0,00012
400	0,00006	0,00009
	$\rho_{cobre} = 0,0225 \Omega mm^2 / m$	$\rho_{alumínio} = 0,036 \Omega mm^2 / m$