

ALGUNS ASPECTOS ECONÓMICOS DA ESCOLHA DE TRANSFORMADORES

Quando a exploração de energia eléctrica em corrente alternada deu os primeiros passos, utilizaram-se transformadores construídos com materiais magnéticos de qualidade muito inferior à dos materiais modernos. Os rendimentos eram medíocres, as potências mássicas insignificantes.

Só no fim do primeiro decénio do século XX se introduziu a hoje clássica chapa de ferro silicioso, de alta permeabilidade e baixa perda específica. Teores elevados de silício e tratamentos térmicos especiais permitiram a diminuição contínua da perda específica, que dos 3 a 4 W/kg iniciais desceu a menos de 1 W/kg (valores referidos à indução de 1 Tesla e à frequência de 50 Hz). A chapa de cristais orientados introduzida há poucos anos levou a perda específica para níveis ainda mais reduzidos.

Não foi esta melhoria de qualidade integralmente traduzida em benefício do rendimento dos transformadores, mas sobretudo em redução dos seus preços de venda. De facto, as induções magnéticas ultrapassaram largamente os valores dantes praticados (0,9 ou 1 tesla) e foram forçadas até às vizinhanças de 1,5 T e mesmo 1,7 T na chapa de cristais orientados. Ora isto equivale em última análise a uma minoração de dimensões e, por consequência, a uma baixa de preço.

Paradoxalmente, estes transformadores baratos acabam às vezes por sair caros. A despesa anual devida ao juro e amortização do capital investido representa *grosso modo* apenas 1/3 da despesa total, sendo os outros 2/3 absorvidos pela despesa anual por energia perdida. Além disso, a densidade mais elevadas do fluxo magnético correspondem não só perdas mais importantes como ainda mais altas correntes magnetizantes e, por consequência, energias reactivas mais elevadas. O transformador de alta indução fica prejudicado pela tendência geral em tarifar esta energia reactiva.

Encontram-se tais factos na origem da orientação actual, sensível sobretudo no após-guerra, de aproveitar os progressos na metalurgia das chapas magnéticas para melhorar de preferência o rendimento das máquinas e não o seu preço de venda. O transformador racional é aquele que apresenta despesa mínima anual, não o que se adquire a preço inferior. Isto representa um compromisso entre os custos do investimento e as características eléctricas e magnéticas que definem as perdas.

Do que disse é lógico extrapolar que muitos transformadores em serviço, com bastantes anos de funcionamento, consomem talvez em perdas mais do que seria necessário para pagar rapidamente transformadores modernos em sua substituição. É este um dos primeiros aspectos económicos da escolha de transformadores.

Quando se repara um antigo transformador avariado ou se submete a modificação importante (mudança de tensões, por exemplo), o problema põe-se com relevância especial.

Às perdas possivelmente elevadas e às despesas que originam vêm então adicionar-se os gastos de amortização e juros correspondentes à despesa da reparação ou da modificação. A balança pode, nestas circunstâncias, pender mais nitidamente a favor da aquisição dum transformador novo. É este um outro aspecto económico da escolha de transformadores.

Finalmente, quando se pretende comprar um transformador novo e se recebem ofertas das mais distintas procedências, com características e preços dispares, a escolha subordina-se geralmente ao imperativo de um custo anual mínimo. O comprador deve conhecer os factores actuantes sobre tal custo e dispor dum método de cômputo rápido, seguro e expedito. Tal é o último, que não menos importante, aspecto económico da escolha de transformadores.

Um transformador fica definido pelas indicações da sua chapa de características. Aparentemente, estas são impostas de maneira rígida pelas condições concretas da distribuição de energia, exteriores à vontade do utente. Na realidade existe sempre uma maior ou menor latitude de opção, que se reflecte no preço do equipamento. Escolher as principais características do transformador envolve já uma operação económica.

Exemplos rápidos.

- a) Mesmo sem falar da previsão de futuras extensões, a escolha da potência nominal do transformador deve ser objecto de ponderação. Em regra, o ajuste demasiado rígido da potência nominal à potência consumida na instalação está economicamente errado. A potência deve arbitrar-se sempre com certa largueza, pois o aumento de preço correspondente fica mais que compensado pela economia das perdas no cobre.
- b) Salvo em caso excepcionais, a tensão nominal do transformador é um dado imediato. O mesmo não sucede com a gama de regulação, que costuma estabelecer-se de molde a reduzir ao mínimo os inconvenientes económicos resultantes das flutuações de tensão. Para isso deverá o regulador minimizar a média quadrática dos desvios relativos de tensão, ponderados pela potência submetida a tais desvios.

Mas esta condição ideal, a que aliás a técnica não opõe hoje limitações, tem seu contraponto económico. Por um lado, os centros correctores da tensão não podem multiplicar-se *ad infinitum*. Por outro lado, o regulador em carga, que é um aparelho caro, debilita o transformador na proporção directa do número de posições e encarece-o por consequência. A gama do regulador deve por isso resultar do acordo entre o ideal da regulação e o custo, adicionado ao inconveniente, da sua própria realização.

c) Em certas circunstâncias, a tensão de curto-circuito vem imposta pelo paralelo com transformadores pre-existent. Esta *contraínte* tem conduzido algumas vezes a situações paradoxais, que devem combater-se. É o caso duma subestação que se desenvolve a partir dum pequeno transformador, com baixa tensão de curto-circuito. Se o aumento de carga exige a instalação de transformadores cada vez mais potentes e não se quer desclassificar o primeiro, a tensão de curto-circuito ficará amarrada, como numa grilheta, à tensão de curto-circuito do pequeno transformador. Além de disjuntores mais importantes, o utente pagará caro, na primeira avaria séria, a ilusória *economia* que sonhou.

Novos exemplos poderia citar. O fraccionamento da potência, a escolha do grupo de ligação, o nível de isolamento adoptado, outros ainda. Mas creio que estes bastam para documentar de maneira flagrante o peso dos considerandos económicos sobre a escolha, na aparência não aleatória, das características dos transformadores. Uma maior ou menor liberdade de opção existe sempre, nela se pode exprimir e manifestar o tacto do engenheiro.

Mas uma vez estabelecidas as características do transformador, nova questão se levanta, a de comparar entre si os custos anuais correspondentes às várias alternativas apresentadas pelos fabricantes.

Os factores actuantes passam agora a ser:

- juro e taxa de amortização dos capitais investidos,
- custo anual das perdas no ferro e no cobre,
- despesas anuais de conservação.

O total destes termos dividido pela energia que durante o ano atravessa o transformador dá-nos o custo anual de transformação do quilowatt-hora.

O primeiro dos três factores é fixado pelas condições do mercado de capitais e o tempo de vida útil previsto. Sem nos preocuparmos com as modalidades de investimento, olhemos de mais perto o processo de envelhecimento.

Por que envelhecem os transformadores?

Em primeiro lugar porque o progresso técnico não conhece trégua nem repouso. Vivemos na febre das *performances*. Não se esgotam dez anos sem uma autêntica revolução nos processos de fabrico ou na qualidade, na ténpera dos materiais electrotécnicos. A este ritmo diabólico, vinte curtos anos bastam para desclassificar um transformador, relegando-o para o canto inútil das coisas anti-económicas. Mas além deste envelhecimento, relativo e contingente, assiste-se ao verdadeiro e incessante debilitar dos seus órgãos vitais. O aquecimento do transformador é o principal agente da sua própria decomposição. Também, na vida humana, o acto de viver engendra a morte. Os óleos alteram-se, acidificam-se, os isolantes perdem suas qualidades originais, os vernizes diluem-se pouco a pouco, a permeabilidade restringe-se e o coração dos transformadores, a sua bobinagem, oblitera-se a tal ponto que um dia sucumbe a um esforço mais violento.

Esta incidência da temperatura dos transformadores sobre a duração da sua vida útil pode ser bem apreciada pela célebre regra de Montsinger: — na vizinhança dos 100 °C, um acréscimo de aquecimento entre 5 a 10 °C reduz de metade o tempo de vida dos isolantes.

Parece que um transformador vulgar viveria cerca de 15 anos se a temperatura ambiente fosse mantida a 35 °C

e o aquecimento do cobre a 60 °C. A regra de Montsinger habilita-nos a prever a duração de vida para outros aquecimentos:

Aquecimento médio permanente no cobre (°C)	Duração de vida aproximada (anos)
70	7
65	10
60	15
55	23
50	35

Quer dizer: quem adquirir um transformador com 65 °C de aquecimento no cobre e o puser a funcionar a plena carga permanente, não espere ter máquina para mais de dez anos.

Felizmente, os aquecimentos limites não são atingidos senão em breves períodos. Ora basta que a carga média estatística do transformador seja inferior à carga nominal para que a temperatura média estatística se reduza rapidamente e a duração de vida se torne por consequência mais longa. É esta uma nova razão para escolher a potência nominal com folga tranquilizante.

Em rigor, a taxa de amortização deveria variar com as temperaturas (portanto com o diagrama de carga previsto) bem como com os aquecimentos limites impostos ao fabricante. Na realidade é habitual agir doutra maneira, adoptando uma taxa invariável que atende ao envelhecimento absoluto e relativo dos transformadores. A UNIPEDE recomenda períodos de amortização de 25 anos.

Nestas condições, a despesa global de transformação decompõe-se em duas parcelas:

- despesas fixas anuais, que adicionam ao preço anual do investimento os gastos de conservação,
- despesas anuais variáveis devidas às perdas no ferro e no cobre, que crescem, com carga constante, proporcionalmente à duração de serviço.

Como calcular estas despesas?

Se o diagrama de carga for bem definido, não há dificuldade em determinar o custo anual do transformador.

O exemplo simplista que vou tratar refere-se ao diagrama da fig. 1, relativo a uma instalação fabril equipada com um velho transformador de 200 kVA ($\cos \varphi = 0,8$). O transformador sofreu uma avaria e necessita da reconstrução total dos enrolamentos primário e secundário

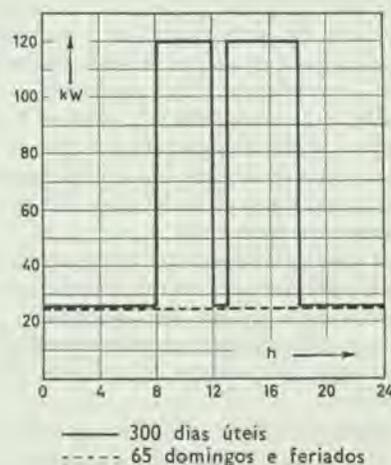


Fig. 1

As perdas e os preços do transformador a reparar e dum transformador novo a adquirir eventualmente em sua substituição são os seguintes:

Transformador	Preço	Perdas no ferro (W)	Perdas no cobre (W)
A reparar (A)	Da reparação: 8000\$00	1400	4300
Novo (B)	De aquisição: 40 000\$00	800	3600

Não foram estes valores colhidos ao acaso: eles correspondem sensivelmente a um transformador com 30 a 40 anos de idade e a um transformador relativamente moderno. Calculemos uma a uma as parcelas que efectam o custo de transformação.

a) *Despesa fixa anual.* Esta despesa será a quantia a pagar anualmente para extinguir em n anos o capital K do investimento, ao juro de $j\%$; terá portanto o valor:

$$F = \frac{(p-1)p^n}{p^n-1} K \quad \text{com} \quad p = 1 + \frac{j}{100}$$

Admitindo amortizações em 25 anos, um juro de 4% e supondo desprezíveis as despesas de conservação, ficará $F = 0,0641 K$. As despesas fixas anuais do transformador A (já totalmente amortizado) e do transformador B serão respectivamente: 513\$00 e 2565\$00.

b) *Despesa anual variável.*

1. *Custo anual das perdas no ferro.* Como se sabe, para frequência e tensão inalteráveis, as perdas no ferro são constantes e independentes da carga. Isto permite calcular imediatamente as despesas anuais correspondentes; supondo que a energia eléctrica é adquirida a \$50/kWh, estas despesas serão de 6120\$00 e 3500\$00, respectivamente para os transformadores A e B .

2. *Custo anual das perdas no cobre.* As perdas no cobre são proporcionais ao quadrado da carga. Os valores indicados no quadro anterior, que se referem à potência nominal (160 kW), possibilitam o cálculo destas perdas em qualquer hipótese de carga.

Do diagrama da fig. 1 deduzem-se as despesas correspondentes: 3570\$00 para o transformador A , 2991\$00 para o transformador B .

c) *Despesa anual total*

Dos valores calculados deriva-se o seguinte quadro:

	Transformador A	Transformador B
Despesa fixa anual	513\$00	2565\$00
Despesa anual variável		
1. perdas no ferro	6120\$00	3500\$00
2. perdas no cobre	3570\$00	2991\$00
Despesa anual total	10 203\$00	9056\$00

Conclui-se deste quadro que o transformador reparado viria a ficar, nas condições expostas, mais caro que o transformador novo, apesar do custo da reparação ser 1/5 do

de aquisição. Conclui-se ainda que o transformador velho deve ser retirado do serviço mesmo que não necessite de reparação, pois a sua despesa anual variável ultrapassa a despesa total do transformador novo.

É de notar que as despesas variáveis do transformador B atingem o dobro das suas despesas fixas: isto ilustra bem a preponderância dos rendimentos na exploração económica das instalações.

Quando o serviço futuro do transformador não está esclarecido, a não ser nas suas linhas gerais, o problema tem de ser tratado com outra amplitude.

Apesar de todas as imprecisões que rodeiam um diagrama de carga ainda mal definido, o utente conhece com suficiente aproximação um dado fundamental: a *utilização* anual da potência do transformador. A utilização é definida como o tempo necessário para a energia anual transformada atravessar o transformador, supondo que este trabalha permanentemente à carga nominal.

A preço constante do quilowatt-hora, é evidente que as despesas fixas sobressaem para pequenas utilizações. Para elevadas utilizações, pelo contrário, são as despesas variáveis que adquirem relevância. O compromisso entre o preço do transformador e as suas perdas depende portanto essencialmente da sua utilização, isto é, existe para cada utilização uma proporção óptima preço/perdas, que torna mínima a despesa anual.

Seria por isso aconselhável que as consultas para fornecimentos de transformadores indicassem explicitamente a utilização prevista. Os fabricantes poderiam dest'arte propor a solução mais vantajosa, executável com o seu material. As ofertas dos diferentes construtores divergiriam ainda, é certo, mas possuiriam uma homogeneidade que doutro modo se perde.

As observações precedentes mostram a importância da utilização anual na exploração económica de transformadores e sugerem mesmo adoptá-la como um dado de base no critério de escolha. O método a seguir exposto, inspirado num estudo do Prof. MELDAHL (A. MELDAHL, *Turbines à vapeur et à gaz*, Revue Brown Boveri, Outubro de 1946) fundamenta-se nestas considerações.

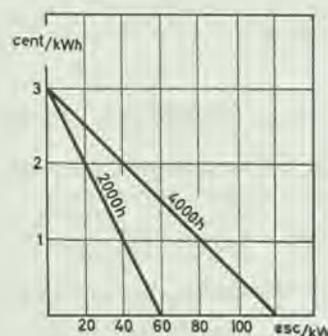


Fig. 2

No gráfico da fig. 2 graduou-se o eixo das abcissas segundo as *despesas fixas por quilowatt-hora fornecido* e o eixo das ordenadas segundo as *despesas variáveis por quilowatt-hora transformado*, ambas calculadas para a potência nominal do transformador.

Aos pontos do eixo das abcissas correspondem transformadores sem despesas variáveis, isto é, fora de serviço ou sem perdas. Aos pontos do eixo das ordenadas correspondem transformadores sem despesas fixas, isto é, completamente amortizados.

Suponhamos que a despesa fixa anual dum transformador com uma utilização de 2000 horas é de 60\$00/kW. Com perdas nulas, o custo de transformação do quilowatt-hora viria igual a 3 centavos. Mas igual seria o custo de transformação dum transformador já amortizado (portanto sem despesas fixas), cujas perdas custassem precisamente aqueles \$03/kWh. Tomando estes dois pontos no gráfico da fig. 2 e unindo-os por um segmento de recta, fácil é verificar que *todos os pontos sobre ele localizados se referem a transformadores com igual custo de transformação* (\$03/kWh no exemplo considerado). É o caso dum transformador com uma despesa fixa de 20\$00/kW, uma despesa variável de \$02/kWh e idêntica utilização (2000 h).

Para utilizações diferentes as rectas terão inclinações diferentes, aproximando-se da horizontal à medida que as utilizações aumentam. A fig. 2 mostra a linha referente a uma utilização de 4000 horas para transformadores com \$03/kWh de custo de transformação. *A inclinação das rectas define portanto a utilização do transformador.*

Estes princípios gerais fornecem um método simples e expedito para extrair, dum feixe de ofertas, o transformador mais conveniente para determinada utilização. A cada unidade corresponde um ponto do gráfico (pontos A, B, C, D, E na fig. 3). Deslocando a partir da origem, paralelamente a si mesma, uma recta com a inclinação referente à utilização prevista, o transformador mais económico será o primeiro encontrado pela recta. É o que decorre imediatamente do facto da intersecção desta recta com o eixo das ordenadas definir o custo de transformação. Aos pontos sucessivamente encontrados correspondem mais elevados custos de transformação.

Do gráfico da fig. 3 extraem-se outras conclusões interessantes. Em primeiro lugar, que os transformadores D e E não são económicos em quaisquer circunstâncias e em

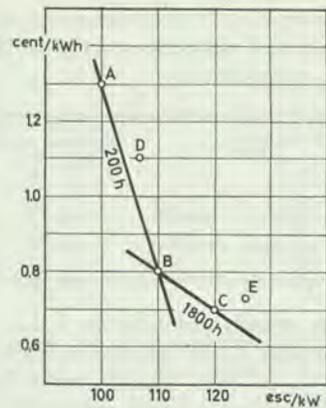


Fig. 3

segundo lugar que para várias hipóteses de utilização o transformador conveniente não é sempre o mesmo. Até 200 h prevalece o transformador A, entre 200 h e 1800 h o transformador B, acima de 1800 h o transformador C. Este método pressupõe que o transformador é desligado da rede durante as horas sem carga. Uma instalação que funciona durante parte do ano, o transformador dum bloco alternador-transformador de central, encontram-se nestas circunstâncias. Mas mesmo para o caso de transformadores permanentemente ligados à rede o método é válido, basta transferir para despesas fixas as despesas anuais devidas às perdas no ferro.

FRANKLIN GUERRA PEREIRA

Engenheiro electrotécnico (U.P.)

CHEFE DE SERVIÇO DA EMPRESA FABRIL DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS

PRÓXIMOS SUMÁRIOS

No número 17, publicaremos os seguintes trabalhos:

O PLANO DE FOMENTO EM MOÇAMBIQUE — Eng.º Manuel Pimentel dos Santos

TELEVISÃO INDUSTRIAL — Eng.º J. E. H. Brace — *Transcrição do «Jornal da English Electric»*

APLICAÇÃO DAS TABELAS DE MARTIN AO CÁLCULO RIGOROSO DE FLECHAS E TENSÕES DE CONDUTORES MONTADOS ENTRE APOIOS DESNIVELADOS — Eng.º Joaquim Albuquerque de Moura Relvas

INTRODUÇÃO À TEORIA DO CONTROLE — Eng.º Mário Trigo Monteiro Trindade

AS BARRAGENS E O TURISMO NACIONAL

O SOL COMO FONTE DE ENERGIA DE ALTO NÍVEL — Prof. Eng.º A. Gouveia Portela

DESTILAÇÃO SOLAR — Eng.ºs J. Laginha Serafim e A. Salgado Prata

COLECTORES A BAIXO POTENCIAL. AQUECIMENTO SOLAR — Eng.ºs J. Almeida Pereira, Salgado Prata e Valente Pereira