

Gestão da Energia e Auditorias Energéticas

Rogério Duarte



Gestão da Energia e Auditorias Energéticas

Rogério Duarte

PUBLICADO POR ROGÉRIO DUARTE

Versão 0.4, maio de 2022 <https://doi.org/10.5281/zenodo.6569842>

Materiais adicionais—ficheiros de código e de dados—e o ficheiro pdf deste documento disponíveis para *download* em: <https://github.com/rduarte2047/gest-energ-materiais>



Gestão da Energia e Auditorias Energéticas (v.o.4) © 2022 por Rogério Duarte está licenciado com uma licença Creative Commons - Atribuição-CompartilhaIgual 4.0 Internacional. Para ler uma cópia desta licença, visite <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>

Conteúdo

	<i>Prefácio</i>	5
1	<i>Introdução</i>	7
	1.1 <i>Energia e desenvolvimento tecnológico^[*]</i>	7
	1.2 <i>Energia e crescimento demográfico</i>	9
	1.3 <i>Energia e desenvolvimento económico</i>	14
	1.4 <i>Energia e ambiente</i>	16
	1.5 <i>Organização do documento: Ferramentas para a gestão da energia</i>	18
	1.6 <i>Exercícios resolvidos e propostos</i>	21
2	<i>Infraestrutura de política energética</i>	25
	2.1 <i>Breve contexto legislativo europeu</i>	27
	2.2 <i>O princípio jurídico de sustentabilidade</i>	29
	2.3 <i>O sistema português da gestão dos consumidores intensivos de energia^[+]</i>	30
	2.4 <i>Estudo de caso: Consumo e política energética em Portugal entre 1980 e 2000^[*]</i>	33
	2.5 <i>Exercícios resolvidos e propostos</i>	37
3	<i>Infraestrutura tecnológica</i>	43
	3.1 <i>Unidades de energia e fatores de conversão^[+]</i>	43
	3.2 <i>Rendimento energético</i>	46
	3.3 <i>Balanço de energia</i>	49
	3.3.1 <i>Sistemas fechados</i>	49
	3.3.2 <i>Sistemas abertos</i>	53
	3.4 <i>Balanço de entropia</i>	56
	3.4.1 <i>Sistemas fechados</i>	56
	3.4.2 <i>Sistemas abertos</i>	60

3.5	<i>Exergia</i>	63
3.5.1	<i>Rendimento exergético</i>	66
3.6	<i>Exercícios resolvidos e propostos</i>	69
4	<i>Infraestrutura económica</i>	77
4.1	<i>Fundamentos</i>	78
4.2	<i>Significado de taxa de juro</i>	83
4.3	<i>Taxa de juro ajustada à inflação</i>	83
4.4	<i>Juros bonificados</i>	85
4.5	<i>Tópicos adicionais sobre prevenção do risco</i>	86
4.5.1	<i>Conceito de elasticidade</i>	88
4.5.2	<i>Outros modelos</i>	91
4.6	<i>Diferença entre perspetivas financeira e de conservação de energia</i>	91
4.7	<i>Exercícios resolvidos e propostos</i>	93
5	<i>Infraestrutura ecológica^[†]</i>	97
5.1	<i>Análise de ciclo de vida</i>	98
5.2	<i>Quadros de fluxos económicos</i>	100
5.3	<i>Exercícios resolvidos e propostos</i>	108
6	<i>Auditoria Energética</i>	111
6.1	<i>Auditoria energéticas e o SGCIE</i>	111
6.2	<i>Análise de processos com diagramas funcionais</i>	115
6.3	<i>Representação de consumos de energia em redes</i>	119
6.4	<i>Diagramas de carga: Determinação de consumos de energia</i>	122
6.5	<i>Contabilidade energética: Retas de regressão</i>	124
6.6	<i>Exercícios resolvidos e propostos</i>	128
7	<i>Conclusão^[†]</i>	133
	<i>Lista de símbolos</i>	139
	<i>Bibliografia</i>	143

Prefácio

A gestão da energia enquanto tópico de investigação independente é relativamente recente. Contudo, face à importância que a energia possui na sociedade contemporânea, é um tema de intensa análise que recebe contributos vindos de diferentes áreas do conhecimento incluindo, as ciências sociais, a economia, a ecologia e a tecnologia.

Naturalmente, a gestão da energia beneficia se se tiver em consideração todos estes domínios e interdependências. Apesar da dificuldade desta tarefa, neste documento tenta-se este objetivo. Para tal, após uma introdução que contextualiza os temas a abordar, apresentam-se ferramentas usadas na gestão da energia em quatro domínios: na política energética, nas tecnologias da energia, na economia de energia e na relação entre a energia e a ecologia. Face ao papel chave que as auditorias energéticas possuem na gestão da energia, aborda-se ainda, com detalhe, competências úteis para o seu desenvolvimento.

Deve referir-se que a espinha dorsal deste documento me foi sugerida pelas folhas de apoio à unidade curricular Gestão da Energia, da Licenciatura em Tecnologia e Gestão Industrial da ESTSetúbal–Instituto Politécnico de Setúbal, da autoria do meu colega Paulo Madeira-Costa. Com efeito, as secções identificadas com [*] são (com ligeiras alterações) da sua autoria. Os capítulos 5 e 7 são em coautoria com os meus colegas Ângela Lacerda-Nobre e Fernando Pimentel. Merecem ainda destaque pela influência que representaram na elaboração deste documento os trabalhos de Zweifel et al. [2017], Hall and Klitgaard [2018], Bejan [1982], Çengel and Boles [2001], Rocha Campos [2016] e Tavares da Silva [2017].

Nota 0.1: Recursos

Este documento e todos os recursos que lhe estão associados, nomeadamente, ficheiros de dados e código usado na resolução de exercícios e na geração de figuras, estão disponíveis no repositório:

<https://github.com/rduarte2047/gest-energ-materiais>

Os ficheiros de código usam a linguagem de programação Julia. Uma forma de executar código nesta linguagem é (i) descarregar e instalar o Julia (<https://julialang.org/>), (ii) descarregar e instalar o programa VSCode (<https://code.visualstudio.com/>) e, (iii) “dentro” do VSCode, instalar a extensão julialang, Julia Language Support (Ver <https://www.julia-vscode.org/>).

1

Introdução

1.1 Energia e desenvolvimento tecnológico^[*]

O desenvolvimento da Humanidade tem estado fortemente relacionado com a utilização de energia. Por um lado, os saltos no desenvolvimento acarretam novas formas de utilização de energia, como por exemplo a descoberta do fogo (há cerca de 1,5 milhões de anos); por outro lado, a descoberta da máquina a vapor (no final do séc.XVII) e a disponibilidade de energia mecânica conseguida com o seu desenvolvimento (durante o séc.XVIII) que possibilitou a “revolução industrial”, económica, social e política subsequentes.

É previsível que, num futuro muito próximo, a disponibilidade e utilização de energia (e os seus impactes ambientais) influenciem ou, mesmo, condicionem o desenvolvimento da Humanidade. Justifica-se, portanto, começarmos por uma apreciação muito global de como a Humanidade tem lidado com a Energia ao longo dos tempos e a nível planetário.

A Terra ter-se-á formado¹ há uns 4 mil milhões de anos, sendo a Humanidade mil vezes mais nova, com uns 4 milhões de anos.

O consumo de energia da Humanidade começou por consistir apenas nos alimentos ingeridos para manutenção do metabolismo. Tratava-se de biomassa ingerida directamente ou, com a caça, através de outros animais. Sendo esta biomassa formada a partir da energia solar, era renovável.

A utilização de ferramentas e utensílios constitui uma diferença importante do Homem relativamente aos outros animais, os quais, salvo raríssimas excepções, utilizam apenas o próprio corpo. As primeiras ferramentas ou utensílios utilizados pelo homem, que se encontraram, são em pedra lascada e datam de há uns 2 milhões de anos.

A descoberta do fogo (há cerca de 1,5 milhões de anos) constituiu um progresso tecnológico importantíssimo, permitindo ao homem cozinhar os alimentos e alimentar-se melhor, proteger-se do frio e defender-se de algumas feras; melhorou assim enormemente a qualidade de vida da Humanidade. Para produzir fogo era necessário combustível, porém, porque era biomassa, portanto renovável e sem problema de abastecimento, para além da sua própria

[*] Texto adaptado de Madeira-Costa [2007]

¹Ver linha temporal logarítmica do universo em https://en.wikipedia.org/wiki/Detailed_logarithmic_timeline

recolha.

O fabrico de utensílios em metal (primeiro em cobre, a partir do II milénio a.C., menos abundante mas com um ponto de fusão mais baixo e, depois, em ferro, a partir do I milénio a.C.) constituiu mais uma evolução importantíssima, a qual acarretou mais um aumento do consumo de energia, agora já com carácter profissional ou intensivo; mas continuou a basear-se na biomassa, sob a forma de lenha ou de carvão vegetal, portanto ainda renovável e sem problema de abastecimento, para além da sua própria recolha.

Podemos considerar que, até à Idade Média (séc. V a XV), não ocorreram desequilíbrios significativos entre a disponibilidade de energia (biomassa criada a partir da energia solar, de forma contínua e renovável) e a sua procura (lenha para combustível). Algumas desflorestações que ocorreram (Norte de África, costa do Adriático, floresta de cedros no Líbano) não tiveram origem numa devastação para fins energéticos.

No séc.XVII, porém, houve já um condicionamento do desenvolvimento industrial por causa do abastecimento energético: A utilização intensiva de carvão de madeira na indústria siderúrgica inglesa levou a problemas no seu abastecimento, até que os irmãos Darby conseguiram produzir o coque, a partir do carvão mineral, extraíndo-lhe as impurezas voláteis que comprometiam a qualidade do ferro produzido; a utilização de coque em vez de carvão de madeira permitiu, então, relançar novamente a indústria siderúrgica.

No final do século XVII dá-se então uma descoberta científica e tecnológica importantíssima: a máquina a vapor. Com ela transformava-se a energia química de um combustível em energia mecânica, deixando-se de estar limitado à energia mecânica fornecida pelo homem ou por animais. Para ter energia mecânica bastava ter combustível; e este parecia ilimitado. Estavam criadas as condições para a "Revolução Industrial". Nas décadas subsequentes deu-se portanto um enorme desenvolvimento industrial e económico, que parecia não ter limites.

Depois de um período de uns 4 milhões de anos em que a Humanidade viveu de forma estável e sustentável com base apenas em energias renováveis, passou-se nos últimos dois séculos a um consumo energético não-sustentado, exponencialmente crescente, com base em combustíveis fósseis não-renováveis.

Na Figura 1.1 está representada a procura de combustíveis nos EUA, com uma forma exponencial quase perfeita, perturbada apenas por grandes acontecimentos com impacto na actividade económica, como as guerras mundiais ou a crise da bolsa de 1929. Nos outros países desenvolvidos, a situação tem sido parecida (embora com defasamentos correspondentes ao seu ritmo de desenvolvimento), observando-se um crescimento exponencial de consumo de energia também a nível mundial.

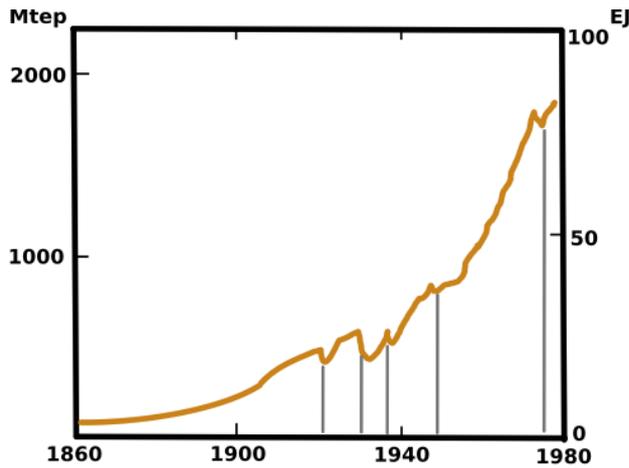


Figura 1.1: Procura de combustíveis nos EUA 1860-1980 [Madeira-Costa, 2007] com t_{ep} a unidade tonelada equivalente de petróleo e Mtep exprimindo $t_{ep} \times 10^6$.

Embora à escala da vida humana os últimos 2 séculos pareçam muito tempo, correspondem, de facto, a um regime transiente e não extrapolável, entre um regime estável de uns 4 milhões de anos e o que vier a seguir; o qual terá, forçosamente, de ser novamente estável e sustentável (ver Nota 1.1).

1.2 Energia e crescimento demográfico

Se atendermos ao gráfico da evolução da população mundial apresentado na Figura 1.2 conclui-se que a par de um aumento do consumo de energia se observa um aumento também exponencial da população mundial.

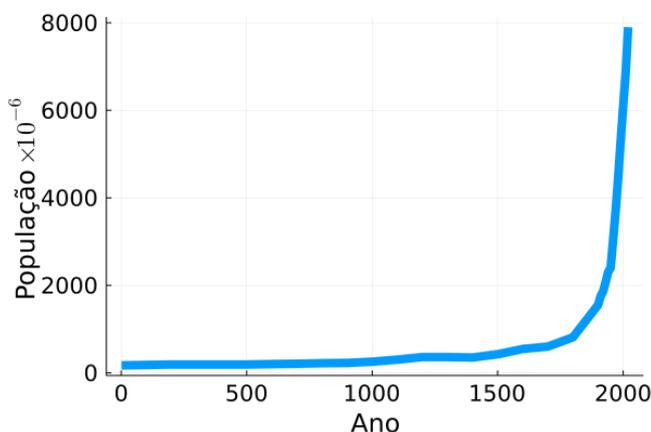


Figura 1.2: Crescimento demográfico exponencial.

Crescimento demográfico e consumo de energia estão por certo relacionados, mas interessa perceber a intensidade desta relação. Para tal, partamos da igualdade,

Nota 1.1: Crescimento exponencial

É corrente ouvir nos noticiários a expressão “crescimento exponencial” para designar um crescimento muito elevado. A Figura 1.1 pode ser aproximada por uma curva de crescimento exponencial com expressão geral,

$$E(t) = E_0 r^{(t-t_0)/\tau}.$$

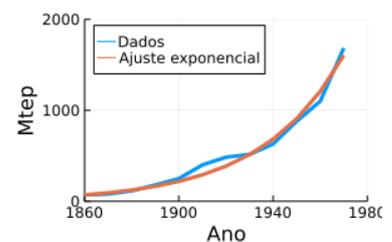
Com E_0 o consumo de energia no instante inicial t_0 , r um fator de crescimento exponencial e τ uma constante de tempo (se $\tau < 1$ e $r > 1$ ou se $\tau > 0$ e $0 < r < 1$ fala-se de decréscimo exponencial).

Para valores obtidos da Figura 1.1, com $E_0 = 70$ Mtep e, aplicando métodos de regressão (não linear) obtêm-se, $r = 3,768$ e $\tau = 46,51$ anos. Ou seja, uma curva exponencial que ajusta os dados da Figura 1.1 é,

$$E(t) = 70 \cdot 3,768^{(t-1860)/46,51}$$

que toma o valor 70 em $t = 1860$ e, de seguida, a cada $\tau = 46,51$ anos observa-se a multiplicação desse valor por $r = 3,768$. A expressão $E(t + \tau) = E(t) \cdot r$, que se pode obter da equação exponencial acima, realça precisamente o efeito multiplicativo do fator de crescimento r .

A figura seguinte mostra o ajuste da curva de crescimento exponencial aos dados.



Dá-se destaque, ainda, aos seguintes aspetos:

i) Crescimento exponencial dá lugar a crescimento linear quando se aplicam logaritmos, resultando a expressão:

$$\log E(t) = \log E_0 + \left(\frac{t-t_0}{\tau} \right) \log r.$$

ii) A expressão de crescimento exponencial é a solução da equação diferencial $dE/dt = kE$ (com $k = 1/\tau$), equação que modela um sistema que armazena (nada perdendo) a energia dE por receber a quantidade kE a cada intervalo de tempo dt . Ou seja, é um sistema aberto sem perdas e onde os recursos disponíveis são inesgotáveis.

iii) Porque na natureza os recursos não são inesgotáveis conclui-se existir um limite prático para o crescimento exponencial.

$$E(t) = P(t) \frac{E(t)}{P(t)}, \quad (1.1)$$

com $E(t)$ e $P(t)$ consumo de energia e população num instante t .
Aplicando a função logaritmo a ambos os membros tem-se,

$$\ln[E(t)] = \ln[P(t)] + \ln \left[\frac{E(t)}{P(t)} \right]. \quad (1.2)$$

Subtraindo ambos os membros da Equação (1.2) por $\ln[E(t-1)]$, para um instante anterior ($t-1$), obtém-se,

$$\begin{aligned} \ln[E(t)] - \ln[E(t-1)] &= \ln[P(t)] - \ln[P(t-1)] \\ &+ \ln \left[\frac{E(t)}{P(t)} \right] - \ln \left[\frac{E(t-1)}{P(t-1)} \right] \Leftrightarrow \\ \Delta \ln(E) &= \Delta \ln(P) + \Delta \ln \left(\frac{E}{P} \right), \end{aligned} \quad (1.3)$$

onde Δ representa o gradiente (a variação no tempo, neste caso).

Sabendo que a derivada do logaritmo de uma função X permite escrever,

$$\frac{d(\ln X)}{dX} = \frac{1}{X} \Leftrightarrow d(\ln X) = \frac{dX}{X} \quad (1.4)$$

e, que o correspondente discreto da Equação (1.4) é

$$\Delta(\ln X) \approx \frac{\Delta X}{X}, \quad (1.5)$$

empregando esta igualdade na Equação (1.3), obtém-se,

$$\frac{\Delta E}{E} \approx \frac{\Delta P}{P} + \frac{\Delta(E/P)}{E/P}. \quad (1.6)$$

A Equação (1.6) corresponde a afirmar que a variação (percentual) do consumo de energia (termo 1) é igual à variação (percentual) da população (termo 2) mais a variação (percentual) do consumo de energia *per capita* (termo 3).

Da Equação (1.6) conclui-se, como esperado, que o crescimento demográfico é proporcional ao crescimento do consumo de energia. Mas também mostra ser possível reduzir o consumo de energia caso o termo 3, o consumo de energia *per capita*, decresça. A redução do consumo *per capita* é conseguida com processos e equipamentos mais eficientes, mas não só; também pode ser atingida por alterações nos padrões comportamentais.

A Tabela 1.1, obtida de Zweifel et al. [2017, p.91], apresenta valores de variação consumo de energia *per capita* (penúltima coluna) e

variação de população (terceira coluna) em diferentes países entre 2000 e 2011.

País	Pop. $\times 10^{-6}$ (2011)	Δ Pop. (2000-2011) [%]	Cons.energ. per capita (2011) [tep]	Δ Cons.energ. per capita (2000-2011) [%]	PIB $\times 10^{-3}$ per capita (2011) [\$EUA]
Alemanha	82	0,0	3,81	-0,6	46,6
Brazil	197	1,1	1,37	2,2	13,2
China	1344	0,6	2,03	7,5	5,6
França	65	0,6	3,87	-0,6	43,8
Índia	1221	1,5	0,17	1,3	1,5
Indonésia	244	1,4	3,07	3,1	3,6
Itália	59	0,4	2,82	-0,6	38,6
Japão	128	0,1	3,61	-1,1	48,2
Paquistão	176	1,9	0,48	0,7	1,2
Rússia	143	-0,2	5,11	1,8	14,3
Turquia	73	1,3	1,54	2,2	11,4
Reino Unido	63	0,7	2,97	-2,2	42,0
EUA	312	0,9	7,03	-1,2	49,9

Dos resultados apresentados na Tabela 1.1 verifica-se, em primeiro lugar, o crescimento demográfico generalizado (a exceção é a Rússia); constata-se, ainda, existirem países onde o incremento percentual do consumo de energia *per capita* é, efetivamente, negativo. São estes países a França, a Alemanha, a Itália, o Japão, o Reino Unido e os Estados Unidos da América (EUA). Um facto que merece destaque é serem estes os países que geram mais riqueza, possuindo valores de Produto Interno Bruto (PIB) *per capita* no ano de 2011 muito superior aos demais.

Definindo o indicador Intensidade Energética, IE , pela expressão,

$$IE(t) = \frac{\text{Consumo de energia}(t)}{\text{PIB}(t)}, \quad (1.7)$$

que relaciona para um certo país e, num determinado ano, t , o consumo de energia com a riqueza produzida, é possível conhecer uma medida da quantidade de energia extra necessária para produzir uma unidade adicional de riqueza.

Na Figura 1.3 apresenta-se a evolução da intensidade energética nos EUA e no Reino Unido nos séculos XIX e XX. Constata-se que, até ao final do primeiro quartel de 1900 esta aumentou mas, a partir daí, diminuiu. Para os EUA esta diminuição tem lugar precisamente quando se começa a observar um crescimento significativo do PIB.

Tabela 1.1: Variação demográfica e de consumo energético *per capita* (expresso em tep, tonelada equivalente de petróleo) entre 2000 e 2011 (fonte: World Bank 2014, in Zweifel et al., 2017)). PIB *per capita* em 2011 (fonte: World Bank, 2022).

A explicação clássica para este fenómeno associa consumo de energia ao estado de desenvolvimento económico do país. Numa fase de desenvolvimento inicial, a geração de riqueza assenta no sector primário, de que fazem parte as indústrias extractivas e outras muito consumidoras de energia. Posteriormente, o desenvolvimento dá-se com base nos sectores secundário e terciário, menos energívoros, contribuindo, em simultâneo, o acesso a tecnologia mais desenvolvida para uma produção e utilização mais eficiente da energia.

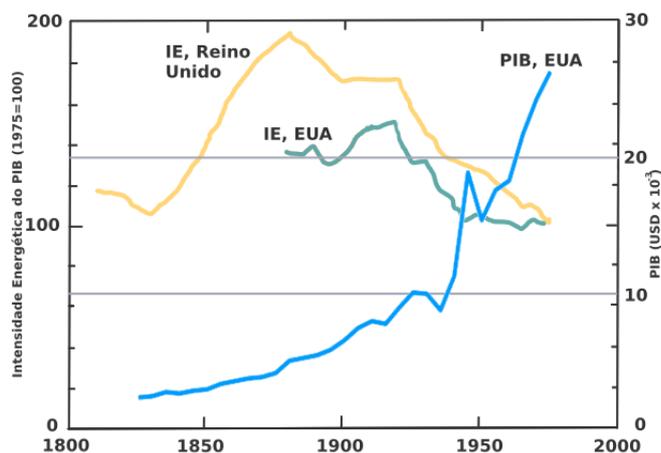


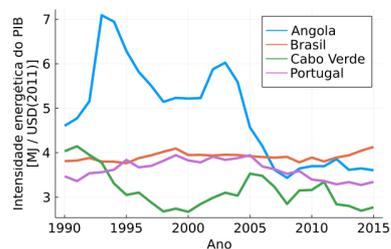
Figura 1.3: Intensidade energética nos EUA e Reino Unido [Madeira-Costa, 2007]. PIB *per capita* nos EUA (fonte: www.gapminder.org)

Apoiando esta leitura, na Figura 1.4 apresenta-se a evolução da intensidade energética (entre 1925 e 1975) para sociedades com características socioeconómicas distintas, representando diferentes fases dos desenvolvimento económico.

Constata-se um decréscimo da intensidade energética nas regiões mais desenvolvidas—países com maior PIB *per capita*; i.e., países da OCDE—, enquanto que, no mesmo período, nos países em vias de desenvolvimento e nos países do antigo “bloco de leste”, a intensidade energética aumentou.

Esta possibilidade de reduzir a intensidade energética—constatada igualmente na Tabela 1.1—permite-nos acalentar alguma esperança relativamente à situação preocupante do consumo de energia. Com efeito, é possível as economias e os países desenvolverem-se aumentando o nível de vida das populações sem recorrer a quantidades cada vez maiores de energia.

Nota 1.2: Evolução da intensidade energética em países de expressão oficial portuguesa



(fonte: World Bank, 2022)

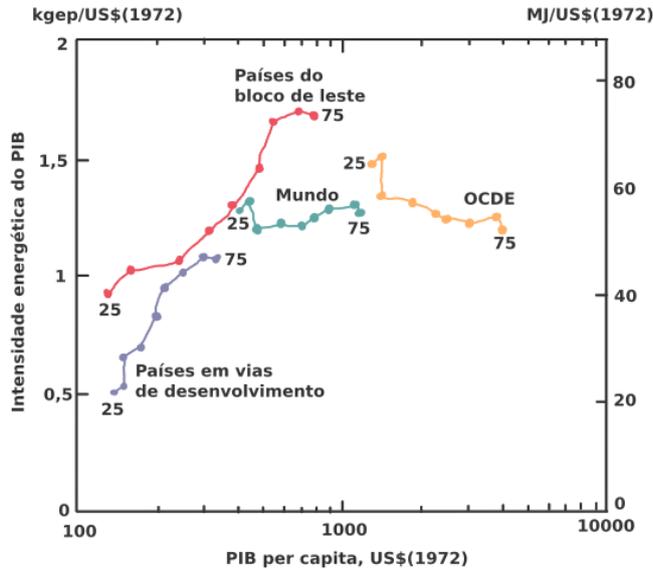


Figura 1.4: Intensidade energética versus PIB *per capita* [Madeira-Costa, 2007].

[Nota 1.3]

O Balanço Energético

Nas figuras até agora apresentadas trata-se a energia primária, aquela que é extraída ou produzida no país, ou importada pelo país. Porém, é também muito comum analisar-se o consumo de energia final; a energia obtida após transformação da energia primária para uma forma mais fácil de comercializar (tipicamente, energia elétrica e combustíveis refinados).

Para compreender a distinção entre energia primária e final é útil introduzir o *Balanço Energético*, um método de contabilidade energética que *mapeia* o percurso das diferentes formas de energia primária desde que entram ou são geradas no país até que ficam disponíveis para os diferentes setores da economia.

O fluxograma na Figura 1.5 [adaptado de Zweifel et al., 2017, p.23] mostra como este *mapeamento* da energia num país é feito (reporando, tipicamente, a períodos de 1 ano).

No lado esquerdo do fluxograma tem-se a energia que entra no país porque é importada ou porque é gerada/ extraída no país. Esta quantidade de energia subtraída de exportações define a energia primária disponível para transformação e consumo interno. Note-se que a dimensão das setas traduz percentagens; assim, no caso representado, as importações de energia superam a geração/ extração de energia em aproximadamente 3 vezes. Determinada a energia primária e, especialmente para o caso dos combustíveis fósseis, há que considerar a conversão noutras formas de energia (e.g., eletricidade, gasolina, gasóleo). Nesta conversão de combustíveis fósseis e no transporte de eletricidade observam-se perdas. Há ainda que distinguir a utilização não-energética do petróleo e seus derivados, essencialmente pelas indústrias química e de plásticos. Tem-se, en-

[Nota 1.3]

[Nota 1.3]

tão, após transformação e transporte, uma medida da energia final disponível, usada nos diferentes setores da economia. Na Figura 1.5 estes setores são o industrial, transportes, edifícios de habitação e edifícios de serviços.

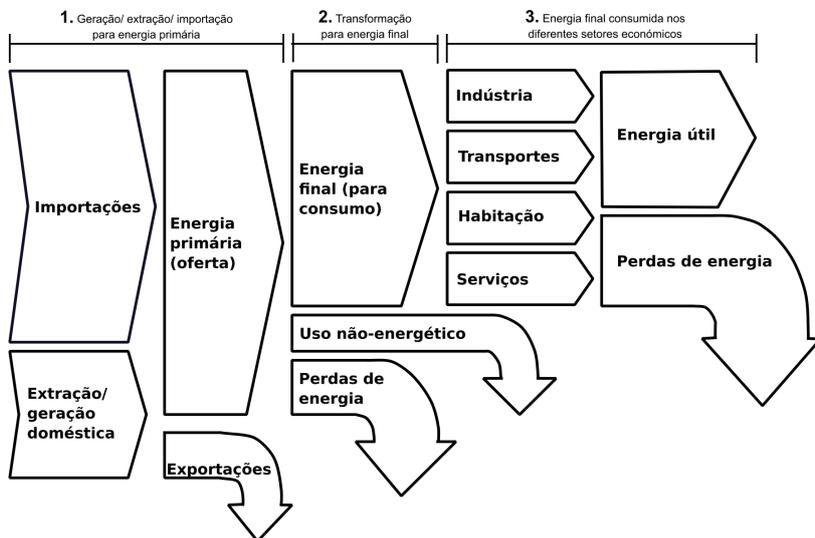


Figura 1.5: Percurso da energia desde que entra ou é gerada num país até ser consumida num dos grandes setores da economia.

Em todos os passos representados, desde a energia primária até à energia útil, ocorrem perdas que importa, naturalmente, contabilizar e minimizar. Ver-se-á no Capítulo 3 que, termodinamicamente, é impossível anular as perdas de processos de produção de trabalho a partir de calor; porém, é possível determinar o rendimento máximo teórico de processos e, com esse ponto de partida determinar quão ineficientes são os processos.

[Nota 1.3]

1.3 Energia e desenvolvimento económico

Com a Equação (1.6) propôs-se um modelo para o consumo de energia que depende exclusivamente no crescimento demográfico, contudo, ao longo da secção 1.2 verificou-se que o desenvolvimento económico também condiciona o consumo de energia. Faz sentido, portanto, acrescentar à Equação (1.1) uma variável independente que exprima o desenvolvimento económico, por exemplo, o PIB. Exprimindo a Equação (1.1) na forma,

$$E(t) = P(t) \cdot \frac{PIB(t)}{P(t)} \cdot \frac{E(t)}{PIB(t)}, \quad (1.8)$$

com $PIB(t)$ o produto interno bruto (de um país) num instante t , por analogia com a dedução da secção 1.2 obtém-se à expressão,

$$\frac{\Delta E}{E} \approx \frac{\Delta P}{P} + \frac{\Delta(\text{PIB}/P)}{\text{PIB}/P} + \frac{\Delta(E/\text{PIB})}{E/\text{PIB}}. \quad (1.9)$$

No termo 3 da Equação (1.9) reconhece-se a variação (percentual) do poder de compra *per capita*, um termo de natureza económica e, no termo 4, a variação da intensidade energética, um termo de natureza tecnológica (mas também comportamental) que traduz a eficiência energética na produção de riqueza.

A Equação (1.9) ajuda a compreender o efeito do nível de desenvolvimento económico de uma economia no consumo energético. Países em vias de desenvolvimento, com taxas de crescimento económico superiores aos países desenvolvidos possuem termos 3 mais elevados. Mesmo que—numa sociedade globalizada—acedam a tecnologia e comportamentos energeticamente eficientes e possuam intensidades energéticas negativas, torna-se mais difícil apenas com base no termo 4 cancelar os termos 2 e 3. No que se refere aos países com economias (ditas) desenvolvidas, face aos já elevados níveis de PIB *per capita*, o termo 3 é tipicamente reduzido, sendo ainda reduzido (e muitas vezes negativo) o crescimento demográfico, termo 2. Justifica-se, então, a maior facilidade de, com base na adoção de tecnologias e comportamento energeticamente eficientes, atingir valores do termo 4 conducentes a reduções percentuais do consumo de energia.

A Tabela 1.2 permite comparar valores dos termos 1 a 4 da Equação (1.9) para os países anteriormente analisados na Tabela 1.1.

País	$\Delta\text{Cons.Energ.P.}$ (2000-2011)[%] (termo 1)	$\Delta\text{Pop.}$ (2000-2011)[%] (termo 2)	$\Delta\text{PIB per capita}$ (2000-2011)[%] (termo 3)	$\Delta\text{Int.Energ.}$ (2000-2011)[%] (termo 4)	(termo 1)– $\sum_{i=2}^4$ (termo <i>i</i>) [%]
Alemanha	-0,7	0,0	1,2	-1,8	-0,1
Brazil	3,4	1,1	2,4	-0,2	0,1
China	8,1	0,6	9,7	-2,1	-0,1
França	0,0	0,6	0,6	-1,2	0,0
Índia	2,8	1,5	3,9	-2,5	-0,1
Indonésia	4,6	1,4	5,9	-2,6	-0,1
Itália	-0,2	0,4	0,0	-0,6	0,0
Japão	-1,1	0,1	0,6	-1,7	-0,1
Paquistão	2,6	1,9	2,2	-1,4	-0,1
Rússia	1,5	-0,2	5,0	-3,1	-0,2
Turquia	3,6	1,3	2,9	-0,7	0,1
Reino Unido	-1,5	0,7	1,1	-3,2	-0,1
EUA	-0,3	0,9	0,7	-1,9	0,0

A Tabela 1.2 mostra que em todos os países se observou a redu-

Tabela 1.2: Variação dos termos da Equação (1.9)—percentagem anual entre 2000 e 2011—para diferentes países [in Zweifel et al., 2017].

ção (percentual anual) da intensidade energética, entre 2000 e 2011. Contudo, pelas razões referidas acima, apenas na Alemanha, Itália, Japão, Reino Unido e EUA, países com economias desenvolvidas, se conseguiram reduções no consumo de energia.

Na última coluna da Tabela 1.2 apresenta-se o erro—face aos dados estatísticos—associado à Equação (1.9). Este erro varia entre -0,2 e 0,1%, sugerindo que, apesar de simples, a Equação (1.9) capta indicadores macroeconómicos relevantes para o estudo do consumo energético nos países.

1.4 Energia e ambiente

Um desenvolvimento importante ocorrido em meados do século XX foi a tomada de consciência que o Homem não tem o direito de aplicar o estatuto de objeto ao planeta Terra e a tudo o que este contém. É a Terra que nos acolhe e permite a vida e, explorando de modo irresponsável os recursos que nos são oferecidos, o Homem coloca a Terra e coloca-se a si mesmo em risco [Serres, 1994].

Nos dias de hoje todos estão conscientes do impacto que a atividade humana tem no planeta Terra. É recorrente nos noticiários falar-se de alterações climáticas, do perigo associado à elevação da temperatura média da atmosfera e do contributo de gases com efeito de estufa (e.g., CO₂, CH₄) para esta elevação.

Na Figura 1.6 apresenta-se a evolução da concentração de CO₂ na atmosfera ao longo dos tempos.

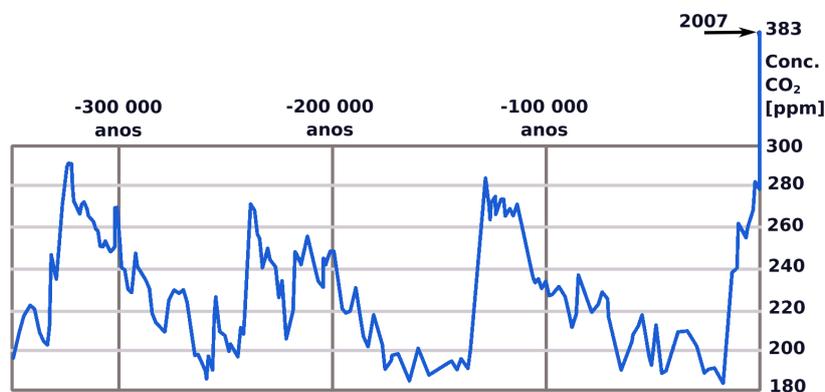


Figura 1.6: Evolução da concentração de CO₂ na atmosfera ao longo dos tempos [dados de amostras de gelo recolhidas em Vostok, Antártida; *in* Hall and Klitgaard, 2018].

A Figura 1.6 evidencia o incremento anómalo—e uma vez mais, exponencial—da concentração de CO₂ na atmosfera no último século. Atendendo ao facto da produção de energia assentar essencialmente na queima de combustíveis, sendo esta queima acompanhada da libertação de CO₂ e, como descrito nas secções anteriores, face ao aumento exponencial do consumo de energia no último século, torna-se natural associar consumo de energia e impacto ambiental.

Sucedem que as emissões de gases com efeito de estufa não provêm apenas da queima de combustíveis para a produção de energia. Na Figura 1.7 apresenta percentagens de emissões de gases com efeito de estufa à escala mundial, em 2006, por setor macroeconómico [Zweifel et al., 2017].

As emissões associadas ao uso dos solos, à agropecuária, ao tratamento de resíduos são agrupadas em emissões não-energéticas². As restantes emissões têm como finalidade a produção de trabalho ou calor usado na indústria, transportes, edifícios ou para a conversão da energia química contida nos combustíveis fósseis noutras formas de energia, nomeadamente, em energia elétrica em centrais termoelétricas.

A inclusão na Figura 1.7 das emissões não-energéticas merece destaque pois mostra como são importantes para a gestão da energia; representando estes processos energéticos que decorrem ao longo da cadeia alimentar e em infraestruturas criadas pelo Homem para suportar a sociedade contemporânea 1/3 do total das emissões de CO₂.

É com este enquadramento que se justifica o uso de modelos³ de impacto ambiental como o proposto por Goeteyn (1996) [in Christofolletti, 1999, p.172],

$$IA(t) = P(t) \cdot \frac{MS(t)}{P(t)} \cdot \frac{ER(t)}{MS(t)} \cdot \frac{IA(t)}{ER(t)}. \quad (1.10)$$

Neste modelo, $IA(t)$ é um indicador de impacto ambiental, $MS(t)$, são mercadorias e serviços produzidas e $ER(t)$ representa a energia e recursos gastos (no instante t).

Desenvolvendo esta expressão como anteriormente referido, da Equação (1.10) obtém-se,

$$\frac{\Delta IA}{IA} \approx \frac{\Delta P}{P} + \frac{\Delta(MS/P)}{(MS)/P} + \frac{\Delta(ER/MS)}{ER/MS} + \frac{\Delta(IA/ER)}{IA/ER}, \quad (1.11)$$

onde o termo 3, MS/P , traduz o padrão de consumo e os termos 4 e 5, ER/MS e IA/ER , refletem aspetos tecnológicos: a eficiência no uso de energia para a produção de bens e serviços e a eficiência na produção de energia e recursos, respetivamente.

A análise da Equação (1.11) fornece pistas adicionais sobre o modo como as sociedades podem reduzir o impacto ambiental e o consumo de energia. O termo 4 aponta para a possibilidade de produzir equipamentos e serviços de forma mais eficiente; por exemplo, dando privilégio à produção local, eliminando custos/consumos/ emissões devidas ao transporte. O termo 5 sugere o uso de processos de produção de energia mais eficientes, responsáveis por menos emissões ou mesmo sem emissões (durante o uso); caso da produção assente em energias renováveis.

Subsiste, ainda, a possibilidade de reduzir mercadorias e serviços

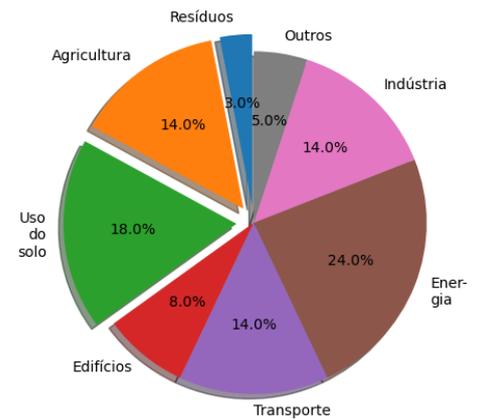


Figura 1.7: Percentagens de emissões de gases com efeito de estufa por setor macroeconómico [ano: 2006; in Hall and Klitgaard, 2018].

²Nas emissões não-energéticas incluem-se as resultantes de processos de “combustão lenta” como, o metabolismo animal e processos de decomposição de matéria orgânica.

³Que têm as emissões de CO₂ equivalente como indicador de referência, mas que podem, naturalmente, relacionar-se com consumo de energia.

produzidos *per capita*, termo 3 da Equação (1.11), sendo que este termo aponta para uma mudança de paradigma, que dê menos valor aos bens materiais e ao consumismo⁴.

⁴No Capítulo 7 reflete-se precisamente sobre esta mudança de paradigma.

1.5 Organização do documento: Ferramentas para a gestão da energia

Do que ficou escrito nas secções anteriores deve reter-se que a gestão da energia não é possível sem ter em consideração e integrar as esferas tecnológica, económica, ecológica e sociopolítica; sendo complexas as relações que se estabelecem entre estas esferas.

Na Tabela 1.3, adaptada de Zweifel et al. [2017], listam-se tópicos e esferas/ domínios de influência que realçam a multidisciplinaridade requerida na abordagem a problemas de gestão da energia. Num texto sobre a gestão da energia é impossível abraçar todos estes tópicos, visto versarem competências muito díspares. É possível, no entanto, introduzir e esboçar relações existentes, abordando as ferramentas usadas em diferentes domínios.

Na Figura 1.8 mostra-se como ferramentas de diferentes domínios contribuem para a gestão da energia tendo em consideração fatores sociopolíticos, tecnológicos, económicos e ecológicos. No cerne das relações entre estes domínios estão infraestruturas naturais e artificiais—criadas pelo homem; e.g., a infraestrutura legislativa—que estabelecem pontes e regulam as relações entre indivíduos, organizações, a economia-geral e a macroeconomia.

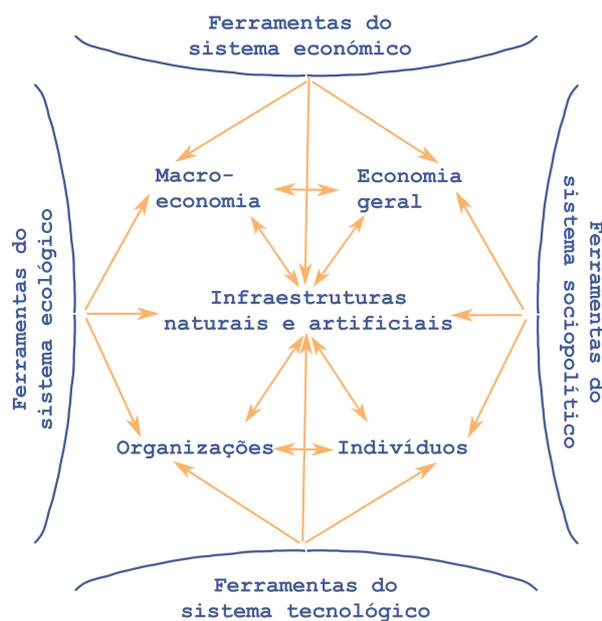


Figura 1.8: Esferas de influência da gestão da energia [adaptado de Christofolletti, 1999, p.164].

Tabela 1.3: Tópicos e domínios de influência englobados na gestão da energia [tradução livre de Zweifel et al., 2017, p.7].

Tópico	Domínio
<ul style="list-style-type: none"> • Sem energia não é possível a atividade económica. Na linguagem da economia, a energia é um fator essencial de produção, como o trabalho. A interrupção do fornecimento de energia (recorde os choques petrolíferos da década de 1970) tem graves consequências na economia e sociedade. 	<ul style="list-style-type: none"> • segurança; economia
<ul style="list-style-type: none"> • Reservas de combustíveis fósseis como crude e gás natural estão concentrados em poucos países. Esta concentração facilita “simbioses” entre empresas (normalmente multinacionais) e políticos gerando-se palcos favoráveis à corrupção. Acresce que os países onde os combustíveis fósseis são mais comuns estão perante o desafio da sua indústria extratora iniciar uma fase de declínio. 	<ul style="list-style-type: none"> • segurança; política; economia
<ul style="list-style-type: none"> • Um outro desafio associado aos sistemas energéticos é o risco de acidentes de larga escala. Este risco não se refere apenas ao nuclear, mas sempre que grandes intensidades energéticas estão concentradas, como sucede no caso de grandes caldeiras, grandes navios petrolíferos. Através de entidades de inspeção procura-se mitigar riscos de acidentes, porém, assimetrias na posse de informação deixa dúvidas sobre a capacidade regulatória. 	<ul style="list-style-type: none"> • segurança; tecnologia; ecologia
<ul style="list-style-type: none"> • Muitos mercados energéticos são na realidade monopólios (um só ator) ou oligopólios (poucos atores) não funcionando o princípio da competição. Nas indústrias de transmissão e redes de distribuição (gás natural, eletricidade, aquecimento/arrefecimento urbano) o monopólio pode ser visto como ‘natural’, não se justificando o estabelecer de infraestruturas com-correntes. No entanto, esta situação implica, sempre, o risco de abuso de posição dominante. Para prevenir isto é normal os governos regularem este tipo de indústria. 	<ul style="list-style-type: none"> • segurança; política
<ul style="list-style-type: none"> • A energia é essencial para satisfazer as necessidades básicas humanas. O desenvolvimento económico em muitas sociedades em desenvolvimento é retardado devido, precisamente, ao deficiente fornecimento de energia. Baixos rendimentos implicam um acesso deficiente à energia limitando a produtividade e a produção de riqueza, perpetuando um círculo vicioso. 	<ul style="list-style-type: none"> • justiça; economia
<ul style="list-style-type: none"> • A escassez de fontes fósseis de energia e os riscos associados às alterações climáticas estão na origem de problemas de justiça intergeracional. Este tipo de justiça exige que decisões atuais relativas a sistemas energéticos reflitam eficientemente os interesses de gerações presente e futuras. 	<ul style="list-style-type: none"> • justiça intergeracional
<ul style="list-style-type: none"> • Um ponto muito discutido são os impactos ambientais (negativos) resultantes da extração, transformação, transmissão e uso da energia. Com efeito, o setor energético é o principal poluidor do ar, água e solo. Em termos económicos, estas emissões representam externalidades negativas que não são em geral refletidas no preço da energia, deturpando desta forma o mercado (não sendo, portanto eficientes na perspetiva de Pareto). 	<ul style="list-style-type: none"> • ecologia; justiça intergeracional
<ul style="list-style-type: none"> • As externalidade ambientais negativas são reduzidas por aumentos de eficiência energética, porém, procura e oferta de investimento em eficiência energética no mercado livre não se desenvolve tão rapidamente quanto desejável. Em resultado, torna-se necessária a intervenção política visando acelerar este processo. 	<ul style="list-style-type: none"> • ecologia; tecnologia; economia; política
<ul style="list-style-type: none"> • Muitas energias renováveis não são no presente competitivas, porém, sê-lo-ão certamente no futuro, quando os preços dos combustíveis fósseis (finitos) aumentarem. Pode existir interesse em acelerar a entrada destas energias renováveis no mercado antes de serem competitivas, justificando-se serem subsidiadas pelo governo que procura dessa forma assegurar um fornecimento futuro de energia. Na tomada de decisão sobre o subsidiar de energias que ainda não são competitivas, para além do estudo da melhorias na eficiência há que ter em consideração a justiça intergeracional. 	<ul style="list-style-type: none"> • tecnologia; economia; política; justiça intergeracional
<ul style="list-style-type: none"> • Investimentos em energia caracterizam-se frequentemente pelo uso de recursos geridos pelo setor público (recursos hídricos, por exemplo) e que requerem direitos para usar espaços públicos (como o solo e vias rodoviárias). Quando comparado com outros mercados, o mercado da energia está muito dependente de decisões políticas e, da opinião pública. 	<ul style="list-style-type: none"> • política; ecologia
<ul style="list-style-type: none"> • A grande maioria das infraestruturas energéticas é caracterizada por longos períodos de planeamento, investimento e operação. Como consequência, a adaptação às variações económicas e sociais é lenta. Porque as tendências no mercado da energia não são fáceis de prever, períodos longos de desajuste às necessidades, com excesso ou falta e capacidade instalada tornam-se mais prováveis. 	<ul style="list-style-type: none"> • política; economia

Tendo como objetivo principal a familiarização com ferramentas úteis para a gestão da energia, este documento desenvolve-se em torno das quatro esferas de influência definidas na Figura 1.8. Cada uma destas esferas é desenvolvida em capítulo próprio—capítulos 2 a 5—, descrevendo-se infraestruturas e/ ou ferramentas úteis para a gestão da energia.

O capítulo 6 descreve em maior detalhe e introduz ferramentas úteis para auditorias energéticas, um instrumento nuclear na gestão da energia.

1.6 Exercícios resolvidos e propostos

[Exercício resolvido 1.1]

A informação quantitativa que está na base da elaboração de balanços energéticos é habitualmente disponibilizada por agências de estatística ou por departamentos de energia. No caso português, estes dados são disponibilizados no sítio da Direção Geral de Energia e Geologia, DGEG (<https://www.dgeg.gov.pt/pt/estatistica/energia/balancos-energeticos/balancos-energeticos-nacionais/>).

Na tabela abaixo apresenta-se um resumo do balanço energético português no ano de 2005 [Madeira-Costa, 2007]. Identificam-se as três etapas em que se divide o balanço energético como definido na Figura 1.5 da **Nota 1.3**: 1) Geração/ extração/ importação para energia primária; 2) Transformação para energia final; 3) Consumo de energia final nos diferentes setores económicos.

Da análise de um balanço energético é possível, entre outros:

- avaliar a repartição da energia final pelos setores de atividade económica, identificando os mais energívoros;
- determinar o peso relativo das energias renováveis no cômputo da energia consumida;
- avaliar o rendimento da conversão de energia primária em final.

Com base nesta informação definem-se indicadores e estabelecem-se metas a atingir tendo em conta as políticas energéticas. Nos próximos capítulos avalia-se a evolução no tempo de indicadores macroeconómicos definidos a partir do balanço energético português. Nesta secção, tendo por base o balanço energético de 2005 apresentado adiante—cuja planilha de cálculo é disponibilizada juntamente com os recursos deste documento, ver **Nota 0.1**—determine:

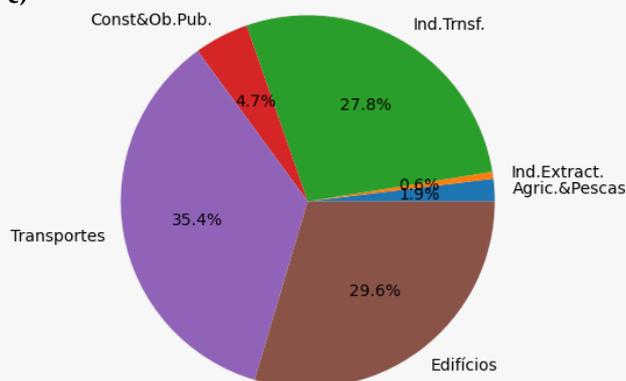
- a) A percentagem do consumo final de petróleo no setor dos transportes.
- b) A percentagem do consumo final de eletricidade nos edifícios (agrupar setores doméstico e serviços).
- c) Obtenha um gráfico circular com a distribuição percentual do consumo de energia final por setores económicos. Agrupe os setores doméstico e de serviços (inclui forças armadas) num setor designado “edifícios”.
- d) A dependência dos combustíveis fósseis como energia primária, expressa em percentagem.
- e) A percentagem de eletricidade disponível para consumo final que teve origem renovável.
- f) A percentagem de eletricidade disponível para consumo final que teve origem em centrais termoelétricas.

Resolução:

a) $6840128/11394558 = 0,60 = 60\%$

b) $(1138820 + 1297246)/3932414 = 0,62 = 62\%$

c)



[Exercício resolvido 1.1]

[Exercício resolvido 1.1]

BALANÇO ENERGÉTICO tep	TOTAL DE CARVÃO	TOTAL DE PETRÓLEO	GÁS NATURAL	Hidroeléctrici- dade	Eólica e Geotérmica e Fot.	Termoelectricid- ade	TOTAL DE ELECTRICIDADE	CALOR	RENOVÁVEIS Sem Hidrica (lenha, res., biogás)	TOTAL GERAL
2005	4= 1+3	22= 15+21	23	31	32	33	34= 31+33	35	41= 36+40	42 = 4+22+23+30+34+35+41
IMPORTAÇÕES	3 225 687	19 504 834	3 904 012				827 836			27 462 369
PRODUÇÃO DOMÉSTICA				440 148	158 842		598 990		2 874 447	3 473 437
VARIAÇÃO DE "STOCKS"	- 123 149	375 094	142 927							394 873
SAIDAS		3 252 805					240 972			3 493 777
Exportações		2 424 661					240 972			2 665 633
Barcos Estrangeiros		416 618								416 618
Aviões Estrangeiros		411 526								411 526
CONSUMO DE ENERGIA PRIMARIA	3 348 835	15 876 936	3 761 084	440 148	158 842		1 185 854		2 874 447	27 047 156
PARA NOVAS FORMAS DE ENERGIA	3 319 651	2 125 059	2 461 884	440 148	158 842	-3 341 836	-3 341 836	-1 449 471	1 154 512	4 269 799
Briquetes										
Coque										
Produtos de Petróleo		- 275 454								- 275 454
Gás de Cidade										
Petroquímica		32 515								
Electricidade	3 319 651	1 356 627	1 941 351	440 148	158 842	-2 842 042	-2 842 042		242 021	4 017 608
Cogeração		1 011 370	520 533			-499 794	-499 794	-1 449 471	912 491	527 645
Produção de Electricidade (Central do Barroso)		187 029	82 253			-81 945	-81 945	-125 845		61 492
Refinação de Petróleo		103 974				-21 432	-21 432	-49 206		33 335
Gás de Cidade		395 140				-47 714	-47 714	-289 598		57 828
Agricultura		17 684	3 959			-4 662	-4 662	-12 759	694	4 916
Alimentação e Bebidas		37 175	45 069			-20 966	-20 966	-41 468		19 810
Texteis		96 522	65 973			-63 689	-63 689	-40 052		58 752
Papel e Artigos de Papel		96 377	158 860			-182 280	-182 280	-715 634	893 981	251 304
Químicas e Plásticos		111 000	103 933			-48 567	-48 567	-171 419		27 462
Cerâmicas		4 917	27 380			-10 970	-10 970	-13 886		7 441
Vidro e Artigos de Vidro		5 404				-2 094	-2 094	-53		3 257
Cimento										
Metalúrgicas										
Siderurgia										
Vestuário, Calçado e Curtumes		5 302	1 036			-2 492	-2 492	-1 303		2 543
Madeira e Artigos de Madeira		44 721				-19 651	-19 651	-21 928	16 712	19 854
Borracha										
Metal-Electro-Mecânicas		4 099				-1 640	-1 640	-215		2 244
Outras										
Extracção de Pedra			15 447			-4 165	-4 165	-8 774		2 508
Serviços		6 000	16 624			-8 958	-8 958	-6 537	1 105	8 234
CONSUMO DO SECTOR ENERGÉTICO		772 077	42 489				595 275	289 598		1 699 439
Consumo Próprio da Refinação		637 784					48 418	289 598		975 800
Perdas da Refinação		120 918								120 918
Coqueria										
Centrais Eléctricas		3 075					149 038			152 113
Bombagem Hidroeléctrica							48 848			48 848
Gás de Cidade										
Extracção de Carvão		2 237					69			2 306
Perdas de Transporte e Distribuição		8 063	42 489				348 902			399 453
CONSUMO COMO MATÉRIA PRIMA		1 654 628								1 654 628
DISPONÍVEL PARA CONSUMO FINAL	29 184	11 325 172	1 256 712				3 932 414	1 159 873	1 719 934	19 423 290
ACERTOS	12 969	-69 386	0				0	2 237		-54 181
CONSUMO FINAL	16 216	11 394 558	1 256 712				3 932 414	1 157 636	1 719 934	19 477 471
AGRICULTURA E PISCAS		278 290	2 865				85 054	12 759		378 968
Agricultura		205 005	2 865				85 054	12 759		305 683
Piscas		73 285								73 285
INDÚSTRIAS EXTRACTIVAS		74 190	6 863				37 350			118 403
INDÚSTRIAS TRANSFORMADORAS	16 216	1 535 808	891 659				1 274 317	1 131 803	555 338	5 405 141
Alimentação e Bebidas		168 887	21 366				145 746	41 468	88 772	466 239
Texteis		93 128	134 641				119 648	40 052	53 201	440 671
Papel e Artigos de Papel		28 448	38 698				187 681	715 634		970 461
Químicas e Plásticos	14 768	204 362	47 771				204 037	220 625	35 165	726 728
Cerâmicas		46 834	325 877				59 625	13 886	342 869	789 091
Vidro e Artigos de Vidro		37 636	159 490				26 258	53	33	223 470
Cimento	1 448	845 829	25 448				112 950		6 190	991 865
Metalúrgicas		12 766	14 717				41 015		5 566	74 064
Siderurgia		17 763	34 535				79 464			131 763
Vestuário, Calçado e Curtumes		6 789	9 193				31 910	1 303		49 196
Madeira e Artigos de Madeira		24 463	14 520				41 863	21 928	22 299	125 073
Borracha		3 465	10 013				16 238			29 716
Metal-Electro-Mecânicas		44 180	50 653				142 334	215	406	237 788
Outras		1 258	4 735				65 547	76 639	836	149 016
CONSTRUÇÃO E OBRAS PÚBLICAS		849 840	5 837				56 015	6 537		918 228
TRANSPORTES		6 840 128	10 575				43 613			6 894 315
Aviões Nacionais		480 022								480 022
Barcos Nacionais		133 359								133 359
Caminho de Ferro		26 916	66				43 613			70 594
Rodoviários		6 199 830	10 509							6 210 340
SECTOR DOMÉSTICO		715 656	200 494				1 138 820		1 164 596	3 219 566
SERVIÇOS (cF.Arm.)		1 100 647	138 420				1 297 246	6 537		2 542 849

Na obtenção deste gráfico usou-se o seguinte código Julia:

```
using PyCall
using PyPlot
pygui(true)
```

[Exercício resolvido 1.1]

[Exercício resolvido 1.1]

```
pygui(:qt5)
labels = ("Agric.&Pescas", "Ind.Extract.", "Ind.Trnsf.", "Const&Ob.Pub.", "Transportes",
"Edifícios")
sizes = [378968, 118403, 5405141, 918228, 6894315, 5762415]
fig1, ax1 = plt.subplots()
ax1.pie(sizes, labels=labels, autopct="%1.1f%%")
ax1.axis("equal")
plt.show()
```

d) $(15876936 + 3761084 + 3348835)/27047156 = 0,85 = 85\%$

e) $(440148 + 158842)/3932414 = 0,15 = 15\%$

f) $(2842042)/3932414 = 0,72 = 72\%$

[Exercício resolvido 1.1]

2

Infraestrutura de política energética

Como se mostra na Tabela 1.3, no final da secção anterior, são muitas as razões que podem levantar dificuldades à gestão da energia pelos países⁵. Para regular os mercados assegurando competitividade, garantir a segurança do abastecimento, atender à emergência climática e à justiça intergeracional, os estados socorrem-se da política energética.

Tal como representado na Figura 2.1, na margem, o objetivo da política energética contemporânea consiste em atender aos objetivos que coalescem nos três vértices do triângulo. Da necessidade de gerir estes objetivos derivam, por seu turno, diferentes combinações de problemas: diferentes dilemas.

Face às posições antagónicas dos atores no mercado de energia, às perspetivas por vezes irreconciliáveis, por vezes ambivalentes, quanto à preponderância da segurança do abastecimento, da proteção do ambiente, dos interesses dos investidores, a decisão sobre grandes investimentos permanece frequentemente bloqueada, envolvida em debates políticos e soluções de compromisso que ficam aquém das expectativas dos diferentes grupos de influência. Ainda assim, é possível associar a diferentes épocas a preponderância de um objetivo face aos restantes.

Historicamente, nos séculos XIX e XX, a política energética começou por se concentrar na segurança. No assegurar do acesso à energia estimulando o investimento em minas de carvão, extração de petróleo, construção de centrais termoelétricas, bem como redes de distribuição de energia [Hall and Klitgaard, 2018]. Foi só por altura do choque petrolífero de 1973 que se estendeu o âmbito de ação da política energética, passando esta a incidir, para além de assegurar o acesso, a *diversificação* das fontes de energia e das redes de abastecimento. A consciência da distinção entre política de oferta e de procura de energia originou, simultaneamente, que temas relativos à poupança e eficiência energética entrassem na agenda política e nos debates públicos.

Avançando para os anos 1980, observou-se um incremento muito importante da contestação à energia nuclear, e, apesar de menos publicitado, nesta década observaram-se igualmente desenvolvimentos tecnológicos significativos no domínio das energias renováveis. Com os anos 1990 desviou-se o foco da política

⁵Na Tabela 1.3 faz-se uma abordagem macroeconómica centrada nas dificuldades que se colocam aos países, contudo, a generalidade destas dificuldades tem paralelo, também, ao nível das organizações e dos indivíduos.



Figura 2.1: Fatores que balizam a política energética dos estados.

Nota 2.1: Os limites do crescimento

Num estudo publicado pelo Clube de Roma em 1972, intitulado “Os limites do crescimento”, escrito por Meadows et al. [1972], usou-se um modelo para prever a evolução demográfica e a evolução de diversos indicadores económicos à escala mundial, prevendo-se o declínio dramático dos recursos naturais e um impacto muito negativo para a sociedade futura. Foi uma coincidência que muito empolou a relevância deste estudo e respetivas previsões pessimistas, que tivesse lugar em 1973 o primeiro choque petrolífero, captando a atenção geral para o tema dos *limites do crescimento económico*. Desde este estudo existe um enfoque grande na modelação das consequências não só na economia como ainda no ambiente da utilização de combustíveis fósseis.

energética para a liberalização dos mercados de energia; concretamente, deram-se os primeiros passos para o desmantelamento dos monopólios (estatais) existentes, criando condições de concorrência. É também nos anos 1990 que ganham impulso os receios das alterações climáticas, tornando-se mais intensas as preocupações com o ambiente a uma escala global. Visto que uma parcela muito importante das emissões mundiais de gases com efeito de estufa é oriunda de processos de produção de energia (recordar a Figura 1.7), política energética e proteção ambiental tornaram-se indissociáveis.

Tratando-se a energia de um bem comum essencial [Hussain, 2018] que a todos interessa e cuja gestão todos afeta, a sua gestão pode ser inserida no âmbito das políticas de bens comuns, designada na literatura inglesa por política de *common-pool resources* [ver Ostrom et al., 1994]. Como se referiu, não cabe neste texto detalhar a política dos bens comuns. Aborda-se, antes, a infraestrutura que dá suporte a políticas energéticas e como pelo uso desta infraestrutura se definem as regras que evitam o uso ineficiente da energia e se solucionam os dilemas que se colocam à sociedade contemporânea neste domínio.

Após o artigo de Hardin [1968] sobre a tragédia dos comuns onde, resumidamente, se refere que se se deixar no interesse individual a produção com base em bens comuns, então, a tendência será esgotar esses bens—ver Nota 2.2—, investigação realizada nas décadas subsequentes veio a sugerir que a *resolução de dilemas sociais* passa pela intervenção de órgãos externos (governos, mas não só) para resolver problemas que surtem quando: (caso 1) não existe forma de garantir que os indivíduos se coordenarão nas decisões para o benefício do grupo, resultando no incentivo do benefício individual em prejuízo do grupo e, (caso 2) é necessário resolver problemas em que indivíduos inseridos num grupo têm de fazer opções onde a melhor solução só é atingível pela coordenação das decisões individuais [Ostrom et al., 1994]. Ao órgão externo cabe (caso 1) regular restringindo a ação individual e, (caso 2) regular verificando/ fiscalizando direitos de propriedade, para coordenar indivíduos de um grupo.

A forma de pôr em prática esta regulação e fiscalização passa, obviamente, por uma infraestrutura legislativa ou normativa (*soft-infrastructure*). Esta estrutura abre caminho para infraestruturas físicas e coordena-se com infraestruturas existentes, como a social e natural. Obviamente, o objetivo deve ser a adequada interligação de todas as infraestruturas; só deste modo se torna efetiva e eficiente a abordagem *top down* materializada na infraestrutura legislativa. Com efeito, sob uma perspetiva económica, uma infraestrutura legislativa desajustada das necessidades representa o desbaratar de recursos que seriam melhor empregues noutros fins.

A Figura 2.2 obtida de Anderies et al. [2016] e baseada no trabalho de Ostrom et al. [1994] mostra a forma como se interligam as infraestruturas legislativa, social e tecnológica/ natural. Nela

Nota 2.2: A tragédia dos bens comuns [com tradução livre de Hardin, 1968]

“A tragédia dos bens comuns desenvolve-se da seguinte forma. Imagine uma pastagem a que todos podem aceder. Cada pastor tenderá a usar a pastagem para o máximo de gado nesse bem comum. Este arranjo funcionará satisfatoriamente durante séculos enquanto gerras, pilhagens e doenças mantiverem os números quer de gado quer de homens abaixo da capacidade de pasto. Porém, chegará o momento em que se atinge a paz e equilíbrio social; mas esse será o instante em que o sistema dos bens comuns resultará em tragédia.

Com efeito, como ser racional, cada pastor procurará maximizar o seu lucro. Explícita ou implicitamente, de forma mais ou menos consciente, o pastor perguntar-se-á, ‘Qual o valor—*para mim*—de acrescentar mais um animal ao rebanho?’ Existem contributos (1) positivo e (2) negativo. 1) O contributo positivo deriva do pastor conseguir vender o animal praticamente sem custo resultando no encaixe da totalidade (+1) do valor do animal. 2) O contributo negativo resulta do consumo adicional de pasto do animal acrescentado ao rebanho. Porém, porque os efeitos do consumo adicional de pasto são suportados por todos os n pastores, o abatimento ao valor do animal adicional é de apenas $-1/n$.

Pesando os contributos positivo e negativo, um pastor racional concluirá que a opção a tomar é a de acrescentar mais um animal ao rebanho. E mais um, e mais um... Mas esta será a conclusão a que chegarão todos os n pastores-rationais que usam o pasto. Cada pastar fica refém de um sistema que o leva a aumentar o rebanho sem limite—num pasto limitado. A ruína é o desfecho para o qual se encaminham os pastores, cada qual perseguindo o seu interesse pessoal numa sociedade que acredita no livre acesso aos bens comuns. E este livre acesso conduzirá, enfim, à ruína a todos.”

Na prática, sucede frequentemente que indivíduos usando um bem comum *comuniquem* uns com os outros acordando regras e estratégias conjuntas. Nos casos em que instituições criadas com base nestes acordos atingem a maioria é, inclusive, possível depreender os princípios que estão na base da robustez dessas instituições e identificar as variáveis chave na gestão da mudança. Comunicação, criação de empatia [Ostrom et al., 1994, p.5], são fatores tidos como determinantes para reduzir a destruição causada pela prevalência do interesse privado; para manter a ordem—a *exergia*, como se chamará no Capítulo 3—num sistema com bens comuns.

identificam-se os participantes e processo de ação, produzindo resultados que, por seu turno, determinam critérios de avaliação e a revisão das infraestruturas do processo decisório e comunicação/ interação (setas a tracejado).

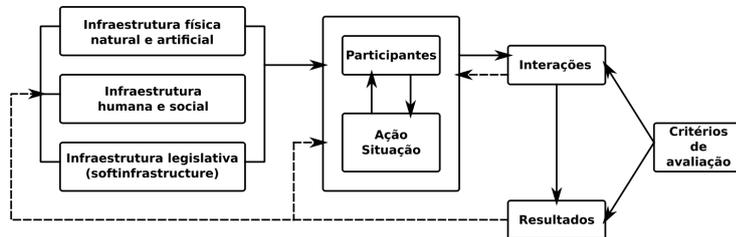


Figura 2.2: Modelo IAD (*Institutional Analysis and Development*) como proposto por Anderies et al. [2016] identificando relações entre infraestruturas, participantes, ação-situação e resultados obtidos.

Repare-se como é essencial a ligação estreita nas questões/ dilemas energéticos entre a legislação, a compreensão do contexto social/ ambiental e a tecnologia. No passado não se colocavam dilemas ambientais, não se colocavam dilemas relativos à opção entre o uso de combustíveis fósseis ou renováveis, simplesmente porque a consciência social, o contexto económico e a evolução tecnológica não impunham/ levantavam essas questões. A *soft infrastructure* que é a legislação tem de ser capaz de acompanhar ou despoletar mudanças nas outras infraestruturas promovendo políticas e comportamentos mais eficazes.

Neste capítulo começamos por uma introdução à infraestrutura legislativa europeia. De seguida, centra-se a análise no caso português, concretamente, na infraestrutura legislativa que dá suporte à política de eficiência energética na indústria. O capítulo termina apresentando como estudo de caso a evolução de indicadores energéticos em Portugal entre os anos 1980 e 2000, comentando-se a sua evolução e as políticas implementadas desde então.

2.1 Breve contexto legislativo europeu

Como se viu, a política energética acompanha e é traçada em função de acontecimentos à escala mundial, como os choques petrolíferos ou a emergência climática. Por este motivo, na sociedade globalizada as decisões legislativas avançam a par na generalidade dos países ou associações de estados, como é o caso da União Europeia (UE).

A União Europeia é o exemplo cabal da importância que a energia e a política energética possuem. Com efeito, o embrião do que é hoje a União Europeia foi a constituição da Comunidade Europeia do Carvão e do Aço (CECA), criada no início dos anos 1950, e cujo propósito foi coordenar o uso de carvão numa altura em que este representava 90% das necessidades energéticas europeias [Ramos and Gomes, 2017]. Este acordo entre países europeus em torno do

carvão é alargado em 1957 com a criação da Comunidade Europeia de Energia Atômica (EURATOM), no mesmo ano em que se cria a CEE, Comunidade Económica Europeia.

Apesar dos tratados firmados, estes não determinavam legislação. Com efeito, os vários Estados Membros sempre foram relutantes em aceitar legislação comunitária no que refere ao aprovisionamento de energia. Só em 1968 se redige a primeira diretiva (Diretiva 68/414/CEE) que obriga os Estados Membros a manter níveis mínimos de aprovisionamento de petróleo e produtos derivados.

Para compreender esta relutância é importante explicar que na Europa a extração/ produção, transporte e distribuição de energia (eletricidade, produtos de petróleo) assentava em estruturas monopolistas estatais que integravam verticalmente a oferta da energia⁶ (para o caso português, a EDP era a única responsável pela produção, transporte e distribuição de energia elétrica).

Compreende-se portanto que, para a União Europeia, para políticas energéticas coordenadas na Europa, se tenha tornado essencial desmantelar estes monopólios; dito de outra forma, procedeu-se à liberalização o mercado de energia. Esta liberalização visou separar as atividades de extração/ produção, transporte e comercialização, permitindo ao acesso de terceiros às redes existentes e instaurando mercados onde existem concorrência.

Com as Diretivas 96/92/CE do Parlamento e 98/30/CE do Conselho Europeu estabeleceram-se regras relativas à transparência dos preços e ao trânsito de eletricidade e gás natural nas redes permitindo, inclusive, o comércio entre Estados Membros.

Já no que à legislação relativa à procura de energia diz respeito, é preciso o advento da crise energética nos anos 1970 para que na Europa se preste mais atenção ao uso racional da energia e comecem a surgir recomendações na área da eficiência energética.

Surgem recomendações relativas ao isolamento térmico de edifícios, sobre a utilização eficiente de energia nas empresas industriais [Santos, 2017], sendo que, ficava na dependência dos Estados Membros a adoção destas recomendações.

Se do lado da oferta a legislação em energia tratou de instituir regras para assegurar o funcionamento de um mercado com mais oferta, na promoção da eficiência energética considera-se legislação visando, para além das normas prescritivas⁷, diferenciação fiscal (discriminação positiva em sede dos impostos, por exemplo, IUC, ISV e IMI) e apoios financeiros provenientes de fundos que disponibilizem verbas para programas de eficiência energética.

Os fundos a que nos referimos tiveram em grande medida origem em programas europeus para a promoção da eficiência energética, iniciando-se com os programas *Thermie* e *SAVE* em 1989 e 1990, respetivamente.

Um impulso para a harmonização da legislação europeia sobre a eficiência energética foi da crescente importância dada às emissões de CO₂ e às metas estabelecidas para a redução destas emissões.

⁶ Apesar de não ter de ser assim—nos EUA, por exemplo, não é—, pode justificar-se a adoção de estruturas monopolistas estatais pelos pesados investimentos, porque o abastecimento e segurança energética são essencialmente questões de política pública; política que visa satisfazer o interesse público coletivo [Tavares da Silva, 2017] e, ainda, porque na extração, transporte e comercialização se usam recursos e se ocupam extensas áreas sob o domínio público.

⁷ Exemplos típicos de legislação em eficiência energética são: (i) imposição de requisitos mínimos de classe de desempenho energético; (ii) obrigatoriedade de etiquetagem energética; (iii) obrigatoriedade de realização de auditorias energéticas; (iv) imposição de penalizações sobre equipamentos ineficientes.

Neste aspeto, políticas de eficiência energética (procura) e de oferta de energia convergem, unindo-se na promoção do uso de energias renováveis, criando condições para que o mercado funcione. Referimo-nos a políticas e legislação cujo objetivo é a descentralização da produção, criando condições para a autoprodução, para o estabelecimento de “comunidades de energia” [Matias Santos, 2021], cujo propósito é o abastecimento às comunidades e não o lucro.

Ao nível setorial e, face ao elevado consumo de combustíveis fósseis nos transportes, legislou-se visando o aumento da eficiência dos motores de combustão e, mais recentemente, visando a transição para a mobilidade elétrica. A mobilidade elétrica insere-se, por seu turno numa quadro mais lato, onde a capacidade de armazenamento das baterias automóveis (*vehicle-to-grid*) está interligada com a gestão da produção e consumo de energia⁸ [Matias Santos, 2021].

Ainda neste âmbito, outra estratégia em que a União Europeia investe é o *power-to-grid* de onde se destaca a economia do hidrogénio. Esta estratégia consiste em aproveitar o excedente (noturno) de eletricidade renovável para num processo de eletrólise da água produzir hidrogénio (ou, com outros processos, combustíveis líquidos) constituindo uma forma adicional de desfasamento entre produção e consumo de energia renovável.

O direito em temas de energia possui a particularidade de estar subordinado não só à regulação ditada pelo parlamento, por entidades administrativas, como ainda por leis da física, normas técnicas e princípios económicos indispensáveis na avaliação da exequibilidade e viabilidade financeira de um investimento.

Ao contrário de outras áreas do direito, o direito de eficiência energética caracteriza-se por adotar o princípio jurídico da sustentabilidade [Tavares da Silva, 2017], que obriga a reduções *contínuas* nos consumos específicos; ou seja, obriga a uma aumento constante da eficiência nos processos.

2.2 O princípio jurídico de sustentabilidade

A Figura 2.3 procura explicar o princípio geral aplicável nos diferentes sistemas—industriais, edifícios, transportes—sujeitos a legislação em eficiência energética.

Na figura distinguem-se as fases de construção e de operação do sistema energético que pode ser uma indústria, um edifício (tipicamente de serviços) ou uma frota de transportes. Na fase de construção, à esquerda, recorre-se à etiquetagem energética dos equipamentos individuais (classe A+, A, B, etc.) e, para certos sistemas—nomeadamente, os edifícios—é necessário observar o cumprimento de regulamentos a partir de resultados de modelação do comportamento energético.

A fase de operação, representada pelo ciclo na parte direita da Figura 2.3, é aquela que implementa o princípio de “sustentabilidade”, também designado na literatura de gestão da qualidade de

⁸Os parques eólicos geram energia em período noturno, sendo importante ter capacidade de armazenamento.

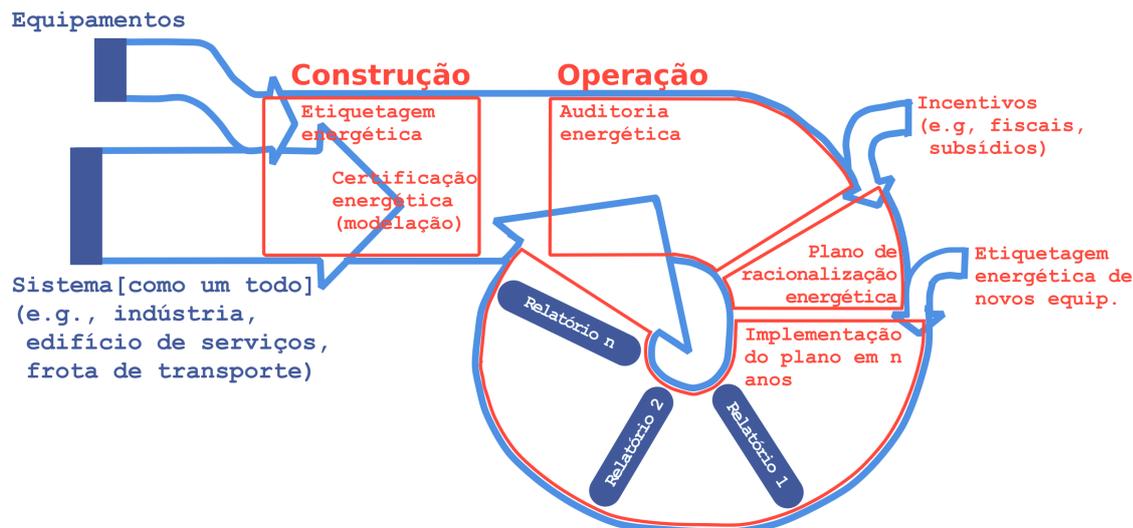


Figura 2.3: Gestão da energia para a eficiência energética e sustentabilidade: Princípio geral.

“melhoria contínua”. A melhoria contínua é um conceito profundamente enraizado nos sistemas de gestão ISO9001 (qualidade), ISO14001 (ambiente) ou ISO50001 (energia) estando igualmente vertido na legislação portuguesa desde os anos 1980.

Como instrumento basilar de melhoria contínua em sistemas energéticos complexos tem-se a auditoria energética, identificada à cabeça do ciclo na Figura 2.3. É com a auditoria energética que se recolhe a informação sobre indicadores de consumo de energia na empresa e se apontam medidas de redução dos consumos que irão integrar os Planos de Racionalização dos consumos. Estes planos, uma vez implementados devem permitir às empresas atingir metas de redução de consumo (definidas com base nos indicadores previamente seleccionados e, num período de tempo previamente estabelecido). Durante o período de implementação do plano de racionalização são gerados relatórios de acompanhamento para monitorizar de perto o desempenho e proceder a ajustes sempre que necessário.

Nas secções seguintes detalha-se *para o caso português* a infraestrutura legislativa relativa à eficiência energética na indústria—o SGCIE—e analisa-se a evolução dos consumos nos vários setores produtivos portugueses, inferindo-se da eficácia da política energética entre as décadas de 1980 e 2000.

2.3 O sistema português da gestão dos consumidores intensivos de energia^[†]

O Decreto-Lei n.º 58/82, de 26 de fevereiro criou o Regulamento de Gestão dos Consumidores de Energia (RGCE, regulamento que antecede o SGCIE), dedicado a legislar especificamente sobre os consumos de energia na indústria. Até 1982 não existia, portanto, qualquer legislação aplicável a consumidores intensivos de energia. Aquando da entrada em vigor, observava-se para o setor da indús-

[†] Na redação desta secção baseamo-nos na entrada “SGCIE” da WikiGlaw, Glossário Jurídico https://wikiglaw.fd.uc.pt/mediawiki/index.php/Sistemas_de_Gest%C3%A3o_dos_Consumos_Intensivos_de_Energia_%E2%80%93_SGCIE

tria (i) uma grande dependência energética do exterior, (ii) forte dependência de combustíveis fósseis, sobretudo petróleo, (iii) grande exposição a variações de preços e disponibilidade das matérias primas, (iv) elevada intensidade energética, (v) elevada intensidade carbónica, (vi) reduzida presença de fontes de energia renovável, (vii) reduzida concorrência nos setores do gás e da eletricidade.

Associado ao Decreto-Lei n.º 58/82 surge um conjunto de normas complementares que deram corpo e forma ao sistema de gestão—ver Figura 2.4. Estas normas encarregavam-se de (i) regulamentar coeficientes de conversão entre diferentes formas de energia, (ii) formalizar o reconhecimento dos técnicos habilitados a atuar no sistema, (iii) definir o modo como se realizam os exames (auditorias) às instalações, com como se elaboram e acompanham os planos de racionalização dos consumos, (iv) a determinação da forma de controlo da execução, do progresso e aprovação do plano, (v) a forma como se elabora o relatório anual e (vi) estabelecimento de coimas.

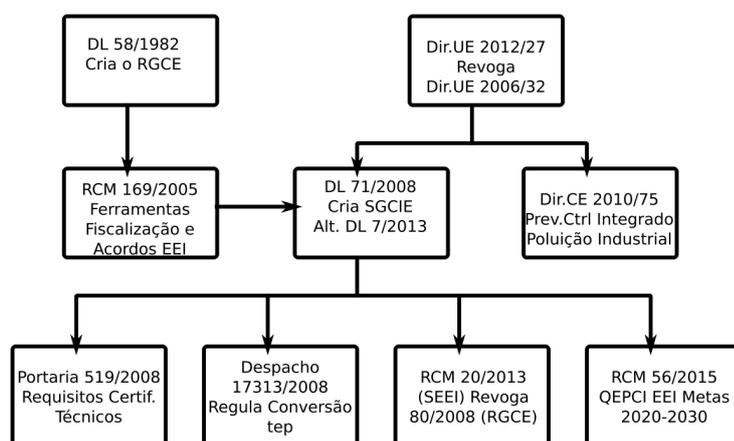


Figura 2.4: Legislação associada ao SGCIE, [baseado em Rocha Campos, 2016]. RCM: Resolução do Conselho de Ministros; DL: Decreto-Lei; DirUE: Diretiva da UE; DirCE: Diretiva do Conselho Europeu.

Ao longo do tempo foram surgindo, ainda, normas enquadradoras de estímulos à utilização racional de energia e ao desenvolvimento de novas formas de energia, com valorização de potencial endógeno. Referimo-nos aos programas VALOREN (1986), ao SIURE (Sistema de Incentivos à Utilização Racional de Energia, 1988).

Foi necessário esperar vinte e três anos, para que, em 2005, Portugal viesse a definir uma Estratégia Nacional para a Eficiência Energética, reformando o RGCE. Há que dizer, porém, que durante esse período de ausência de legislação de fundo em eficiência energética foram dados passos importantes na gestão da oferta de energia. Com efeito, foi nos anos 1990 que se procedeu à diversificação das fontes de energia com a implementação do gasoduto oriundo da Argélia e que se estende hoje ao longo da costa portuguesa de

Sines a Vigo (em Espanha).

As modificações ao RGCE introduzidas em 2005 resultaram, especialmente de exigências em matéria de emissões de gases com efeito de estufa e antevendo o alinhamento com a Diretiva 2006/32/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 5 de abril de 2006, relativa à eficiência na utilização final de energia e aos serviços energéticos no Estados Membros.

Repare-se que a Diretiva 2006/32/CE é muito específica quando indica processos e sistemas passíveis de otimização energética, sugerindo programas tais como (i) utilização eficiente—leia-se substituição/ revisão/ instalação—de ar comprimido, baterias de condensadores, válvulas de controlo automático, (ii) instalação de variadores de velocidade, adoção de motores de alta eficiência, (iii) adoção de sistemas de controlo, sistemas de gestão de carga com *peak shaving*, (iv) equipamentos de cogeração, etc. Estes programas vieram a ser financiados com fundos europeus e nacionais beneficiando as empresas consumidoras intensivas de energia.

Em 23 de agosto de 2006 o governo português aprova em Resolução de Conselho de Ministros o Programa Nacional para as Alterações Climáticas (PNAC), onde se definem critérios energéticos importantes para o setor energético, nomeadamente, alteração de impostos sobre combustíveis mais poluidores usados na indústria (e.g., carvão, fuelóleo) incentivando a sua substituição por combustíveis menos poluentes e processos mais eficientes.

O âmbito de aplicação do RGCE é alargado em 2008 com o Decreto-Lei n.º 71/2008, passando as empresas consumidoras intensivas de energia a estar vinculadas a reduções não apenas de consumo de energia como ainda à manutenção de valores de emissão de CO₂, tal como previsto no Plano Nacional de Atribuição de Licenças de Emissão (PNALE - II). O Decreto-Lei n.º 71/2008 altera ainda a designação de RGCE para SGCIE, Sistema de Gestão dos Consumos Intensivos de Energia, que serve desde então o propósito duplo de aumentar a eficiência energética e reduzir as emissões de gases com efeito de estufa. Desde 2008 não existe alteração ao SGCIE.

A política energética nacional e as políticas europeias não se mostraram suficientes face às pretensões de redução dos consumos [Rocha Campos, 2016]. Iniciada a década 2010, a Comissão Europeia e os Estados Membros concluem da necessidade de se fazer mais, especialmente nos setores dos edifícios e dos transportes. Surge portanto o Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética (PNAEE), aprovado pela Resolução de Conselho de Ministros n.º 20/2013 que inclui as áreas específicas de atuação com vista ao aumento da eficiência energética nos transportes, residencial e serviços (edifícios), indústria e estado (edifícios, ainda).

Um último aspeto a mencionar diz respeito aos atores identificados no SGCIE. Para além das empresas e instalações Consumidoras Intensivas de Energia (CIE) e técnicos credenciados ao serviço destas, interveem no SGCIE a Direção-Geral de Energia e Geologia

(DGEG), a Autoridade Tributária e Aduaneira (AT) e a Agência para a Energia (ADENE). As competências das instituições estatais são:

- A DGEG, além de outras competências, assume o papel de supervisão e fiscalização de todo o processo.
- A AT tem a seu cargo a concessão e controlo das isenções de impostos sobre os combustíveis.
- A ADENE assume a gestão operacional do SGCIE, nomeadamente, (i) organizar e manter o registo de instalações, (ii) receber auditorias e planos de racionalização de consumo de energia com submissão destes últimos a aprovação pela DGEG, (iii) receber pedidos de credenciação de técnicos e entidades, submetendo-os a aprovação da DGEG, (iv) acompanhar a atividade dos operadores e técnicos.

A Figura 2.5 expõe as relações entre os vários atores do SGCIE.

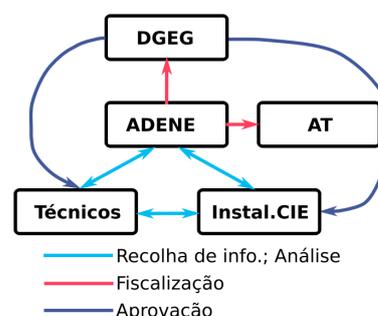


Figura 2.5: Relações entre atores envolvidos no SGCIE.

2.4 Estudo de caso: Consumo e política energética em Portugal entre 1980 e 2000^[*]

[*] Texto adaptado de Madeira-Costa [2007]

As Figuras 2.6 e 2.7 apresentam a evolução da intensidade energética do PIB e do consumo de energia primária e final *per capita* entre 1988 e 2008.

Da Figura 2.6 constata-se que decorridos 30 anos desde o primeiro choque petrolífero a intensidade energética do PIB continuava a aumentar em Portugal. Este comportamento resultou do forte aumento do consumo de energia *per capita*, como se observa na Figura 2.7 e, simultaneamente, de um fraco crescimento do PIB.

A Figura 2.8 mostra a evolução do PIB português entre 1960 a 2019. Nesta figura, a curva da média móvel torna clara a tendência de decréscimo na variação do PIB.

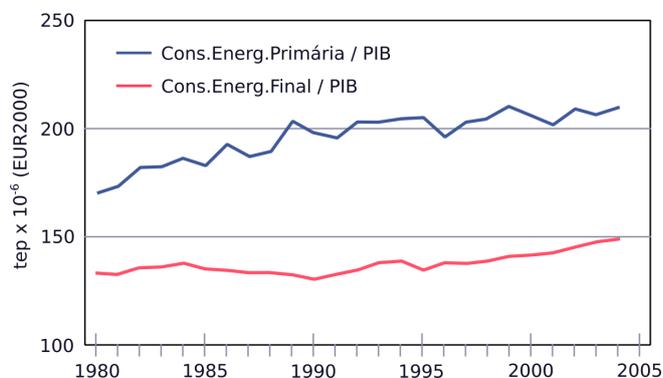


Figura 2.6: Intensidade energética do PIB em Portugal; considerando consumo de energia primária e de energia final (excluindo uso de petróleo como matéria-prima) Madeira-Costa [2007].

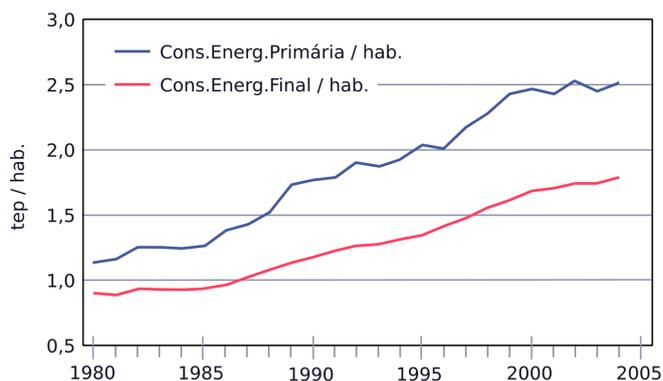


Figura 2.7: Consumo de energia primária e final (excluindo uso de petróleo como matéria-prima) *per capita* em Portugal Madeira-Costa [2007].

A Figura 2.9, que apresenta a evolução do consumo em Portugal desagregado por forma de energia. Permite concluir que o aumento do consumo de energia primária foi em grande medida resultado do consumo de gás natural; combustível introduzido em meados da década de 1990, cujo peso no consumo total tem aumentado continuamente. Apesar do peso crescente deste combustível, não se observou a redução dos consumos nem de petróleo nem de carvão.

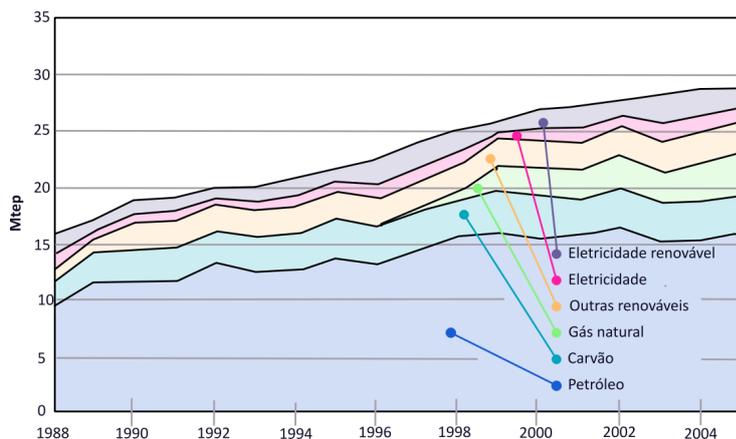


Figura 2.9: Desagregação, por tipo de combustível, da energia primária consumida em Portugal entre 1988 e 2005 [Madeira-Costa, 2007].

Na Figura 2.10 apresenta-se a desagregação do consumo de energia final por setor económico.

Da Figura 2.10 conclui-se que o consumo de energia final na indústria não apresentou entre 1988 e 2005 um aumento significativo, quedando-se pelos 44% do total. Já o mesmo não se passou no setor dos transportes (onde mais do que duplicou o consumo), no sector doméstico (onde o consumo cresceu 2,5 vezes) e nos serviços (que cresceu 3,3 vezes).

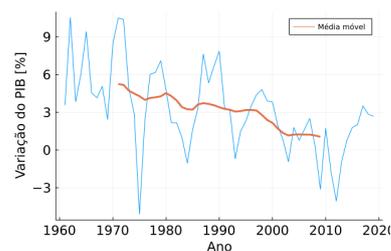


Figura 2.8: Taxa de variação do PIB português. Valores anuais e média móvel simples (dados: Pordata, 2022.02.21, <https://www.pordata.pt/>).

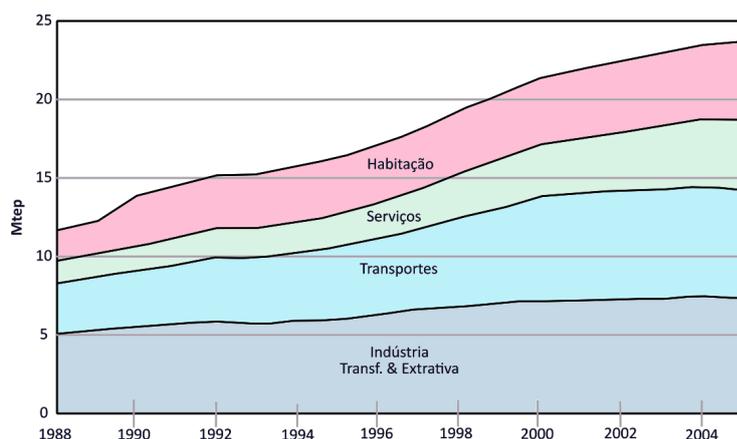


Figura 2.10: Desagregação, por setor económico, da energia final consumida em Portugal entre 1988 e 2005 [Madeira-Costa, 2007].

Dos indicadores energéticos portugueses no início do século XXI, nos anos 2000, podia concluir-se o seguinte:

i) Relativamente às fontes de energia primária:

- o forte crescimento, maior que o do PIB, do consumo, agravando a intensidade energética.
- a forte dependência do petróleo (cerca de 60%), apesar da reintrodução do carvão, da introdução do gás natural e de alguma energia eólica, além da tradicional hidroelectricidade;
- o decréscimo do peso da hidroelectricidade, devido ao aumento do consumo de electricidade; cujo peso caiu em 15 anos de metade do total para aproximadamente um quarto da eletricidade produzida.

ii) Relativamente ao consumo de energia final:

- o forte crescimento, maior que o do PIB, aumentando portanto a intensidade energética (da energia final);
- o forte peso dos transportes no consumo de petróleo, representando cerca de 60% do consumo;
- o forte peso dos edifícios (englobando o sector doméstico e os serviços), representando cerca de 60% do consumo de electricidade.

A situação energética portuguesa nos anos 2000 era, portanto, preocupante, confirmando-se—como aliás foi referido na secção anterior—a necessidade de adotar políticas energéticas mais eficazes na redução do consumo de energia e na redução da dependência do petróleo.

Um aspeto que deve ser realçado é o reduzido aumento do consumo de energia no setor industrial, muito menor do que o observado nos restantes setores.

Apesar de não ser o objetivo desta secção descrever a evolução dos consumos em Portugal de 2005 em diante, por tudo o que foi apresentado tornam-se evidentes as políticas energéticas a adotar:

1. do lado da procura, era imperioso promover a “utilização racional da energia”, evitando os desperdícios e obtendo os efeitos úteis com o consumo mínimo de energia. Os sectores críticos eram, como vimos, os transportes e os edifícios, já que na indústria se observava uma evolução “menos má”.
2. do lado da oferta, impunha-se reforçar o investimento em fontes de energia renováveis, que, em abono da verdade, abundam em Portugal.

Estas políticas foram efetivamente implementadas, estando Portugal, no presente, em 2022, acima da média europeia no contributo das energias renováveis para produção endógena de eletricidade; tendo Portugal abraçado legislação que permitiu melhorar a qualidade dos materiais empregues e o desempenho energético global dos edifícios—num setor, o da construção, muito conservador e resistente à inovação—e, tendo sido adotadas medidas para a mudança de paradigma no setor dos transportes.

2.5 Exercícios resolvidos e propostos

[Exercício proposto 2.1]

Nota prévia: Na tabela abaixo faz-se um breve resumo de legislação na área da energia com enfoque na indústria. Adverte-se, porém, para o facto da legislação sofrer alterações, desatualizando o conteúdo da tabela. Assim, deve consultar o sítio <https://dre.pt/dre/home>, procurando, sempre que existam, as versões consolidadas; aquelas que refletem todas as alterações ocorridas na legislação ao longo dos anos.

Âmbito	Legislação
Reg.Gest.Energ.Transportes (com massas específicas)	Portaria n.228/90 de 27 de março
Decreto Lei que regula SGCIE	Decreto-Lei n.71/2008 de 15 de abril
Credenciação de técnicos e entidades	Portaria n.519/2008 de 25 de junho
Fatores de conversão	Aviso n.18670/2008 de 26 de junho
Objetivos da auditoria energética	Despacho n.17449/2008 de 27 de junho
Sobre emissões de CO ₂	Portaria n.1530/2008 de 29 de dezembro de 2008
Serviços energéticos por terceiros	Decreto-Lei n.319/2009 de 3 de novembro
Credenciação de técnicos e entidades (SGCIE e Transportes)	Lei n.7/2013 de 22 de janeiro
Sobre cogeração	Decreto-Lei n.68-A/2015 de 30 de abril

Secundando a exposição realizada neste capítulo com a consulta de legislação portuguesa na área da energia, responda às questões e selecione as opções que tornam verdadeiras as afirmações.

- Em que ano é aprovado o RGCE (DL58/82, de 26 de fevereiro)?
- O RGCE surge num contexto de [aumento acentuado/ pequeno aumento/ redução] dos preços dos combustíveis.
- A situação energética nacional no início da década 1980 caracterizava-se por:
 - [Elevada/ Reduzida] dependência energética do exterior.
 - [Elevada/ Reduzida] dependência do petróleo.
 - [Elevada/ Reduzida] intensidade energética.
- O RGCE dirige-se aos [edifícios/ indústria/ transportes].
- Com o RGCE atingem-se os seguintes objetivos:
 - Formalizam-se os [vilões/ atores] do sistema nacional de gestão de energia.
 - Definem-se [auditorias/ vistorias] bem como [planos de investimento/ planos de racionalização] e [relatórios periódicos/ relatórios financeiros] a realizar pelas empresas.
 - Definem-se [coimas/ consumos mínimos].
- Para reforçar o aumento da eficiência energética na indústria e a par de políticas energéticas de diversificação das fontes de energia primária—nomeadamente, com a aposta no/a [mobilidade elétrica/ gás natural]—, criaram-se sistemas de incentivo como o [PNALE/ SIURE/ SURE] e aprovou-se em [ano?] o regulamento específico para a racionalização do consumo no setor dos transportes.
- Identifique [V/F] áreas tecnológicas onde se procurou com sistemas de incentivo fomentar melhorias de eficiência energética:
 - motores elétricos mais eficientes.

[Exercício proposto 2.1]

[Exercício proposto 2.1]

- b) controlo manual de permuta de calor
- c) gestão de carga com controlo de picos
- d) produção combinada de calor e potência (cogeração)
- e) climatização em edifícios administrativos
- f) queimadores para caldeiras com controlo on-off
- g) variadores de velocidade

8. Com o entrar no século XXI, o tomar de consciência da importância de travar o aumento das emissões de gases com efeito de estufa leva à aprovação do plano de alterações climáticas [PNACE/ PNAC/ SIURE] em 2006 e ao compromisso de redução de emissões de Gases com Efeito de Estufa (GEE), expresso no PNALE, Plano Nacional de Atribuição de Licenças de Emissão de [SO₂/ CO₂/ H₂SO₄].

9. Em [ano?] entra em vigor novo regulamento dirigido à indústria, designado [SIURE/ RGCIE/ SGCIE] que, para além de imperativos de eficiência energética traduz imperativos de emissão de GEE, introduzindo para além de indicadores relativos a consumo específico um indicador de [intensidade carbónica/ consumo volúmico/ intensidade do valor acrescentado bruto]. Este novo sistema pretende ainda estimular a adesão das empresas a normas ISO [9001/ 140001/ 50001].

10. Identifique [V/F], justificando com exemplos concretos (e.g., Decretos-Lei, siglas de planos), os mecanismos através dos quais se promoveu a eficiência energética em Portugal e que ficaram sob a alçada/ responsabilidade da Direção Geral da Energia e Geologia (DGEG) :

- a) Investigação.
- b) Planos nacionais/ metas do Governo.
- c) Legislação/ regulamentação.
- d) Incentivos/ subsídios.
- e) Impostos/ política fiscal.

11. Para além da promoção da eficiência energética implementaram-se políticas de investimento nas [energias nucleares/ energias renováveis/ energias alternativas], certificação de edifícios, etiquetagem energética, mobilidade elétrica, renovação de edifícios públicos (renovação do parque escolar, por exemplo), entre outros.

12. O SGCIE, Sistema de Gestão dos Consumos Intensivos de Energia, envolve as seguintes entidades [escreva por extenso o significado dos acrónimos/ siglas]:

- a) DGEG.
- b) AT.
- c) ADENE.

e, ainda, a instalação CIE e indivíduos ou entidades responsáveis pela realização de auditorias, planos de racionalização e relatórios de acompanhamento.

As entidades públicas acima têm por missão [risque o que não interessa]:

- d) DGEG, [organizar e manter registo de instalações/ fiscalização/ concessão de isenções do ISP];
- e) AT, [organizar e manter registo de instalações/ fiscalização/ concessão de isenções do ISP];
- f) ADENE, [organizar e manter registo de instalações/ fiscalização/ concessão de isenções do ISP].

[Exercício resolvido 2.1]

Com base nos balanços energéticos portugueses disponibilizados juntamente com os recursos deste documento, ver **Nota 0.1**:

- a) Preencha os espaços vazios da tabela com valores de **energia primária** nos anos 1998, 2008 e 2018 (os valores relativos a 1988 encontram-se pré-preenchidos).

[Relativo a Energ.Primária]	1988	Δ[%]	1998	Δ[%]	2008	Δ[%]	2018
População (a)·10 ⁻³	10000	1,5%	10149	4,7%	10627	-3,0%	10284
Consumo total [ktep]	13987						
Cons.per capita [tep/habitante]	1,40	-		-		-	
Cons.Petr.Energético [ktep]	9518						
Cons.Petr.Energ./Total [%]	68	-		-		-	
Cons.Gás Natural [ktep]	0						
Cons.GásNat./Total [%]	0	-		-		-	
[Prod.]Eletric.Renov. [ktep]	1058						
[Prod.]Outras Renov. [ktep]	1118						
Cons.Energ.Renov./Total [%]	16	-		-		-	

a) Fonte: Pordata (<https://www.pordata.pt/Portugal/Populaç~ao+residente++média+anual+total+e+por+sexo-6>, acedido a 5 de 2022).

- b) Faça um gráfico com a evolução do consumo primário total, do consumo de petróleo energético e de gás natural.
- c) Faça um gráfico com a evolução percentual, face ao consumo (primário) total, do consumo de (petróleo + gás natural) e de energias renováveis (eletricidade + outras).
- d) Comente os gráficos obtidos nas alíneas anteriores relacionando-os com políticas energéticas implementadas.

Resolução:

a)

[Relativo a Energ.Primária]	1988	Δ[%]	1998	Δ[%]	2008	Δ[%]	2018
População·10 ⁻³ (a)	10000	1,5%	10149	4,7%	10627	-3,0%	10284
Consumo total [ktep]	13987	66%	23209	4%	24215	-7%	22476
Cons.per capita [tep/habitante]	1,40	-	2,32	-	2,42	-	2,25
Cons.Petr.Energético [ktep]	9518	62%	15402	-20%	12393	-25%	9249
Cons.Petr.Energ./Total [%]	68	-	66	-	51	-	41
Cons.Gás Natural [ktep]	0	-	700	494%	4157	21%	5044
Cons.GásNat./Total [%]	0	-	3	-	17	-	22
[Prod.]Eletric.Renov. [ktep]	1058	10%	1159	-1%	1142	107%	2363
[Prod.]Outras Renov. [ktep]	1118	122%	2484	28%	3174	15%	3653
Cons.Energ.Renov./Total [%]	16	-	16	-	18	-	27

- b) Com o código abaixo obtém-se o gráfico pretendido.

```
data=DataFrame(CSV.File("/home/rd/git/gestenergbook/code/dataEx2_0.csv"))
plotEx2_0_b=Plots.plot(
    data.Ano,Matrix(data[:,["Cons.Total","Cons.Petrol","Cons.GN"]]),
    framestyle=:box,
    xticks=[1988,1998,2008,2018],
    xguidefontsize=14,
    xtickfontsize=14,
    ylabel="Consumo de energia [Mtep]",
```

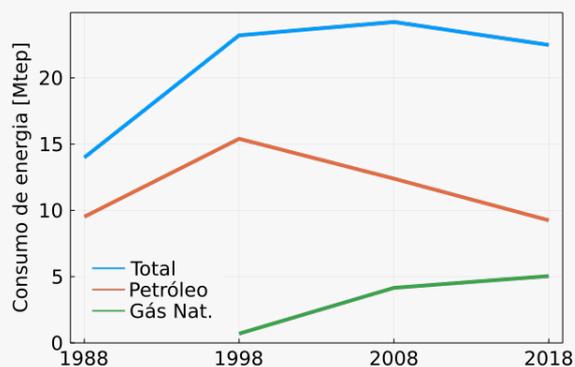
[Exercício resolvido 2.1]

[Exercício resolvido 2.1]

```

yguidefontsize=14,
ytickfontsize=14,
lw=4,
legend=:bottomleft,
fg_legend = :transparent,
legendfontsize=14,
label = ["Total" "Petróleo" "Gás Nat."]
)

```

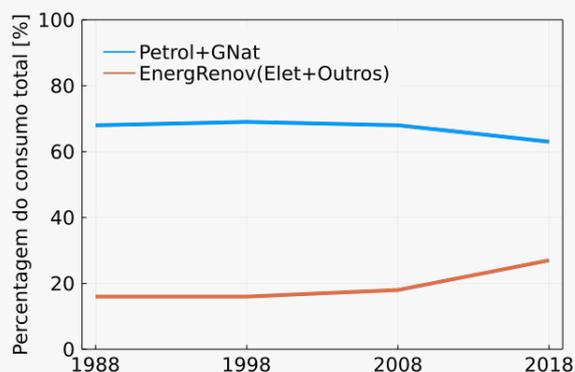


c) Com o código abaixo obtém-se o gráfico pretendido.

```

data=DataFrame(CSV.File("/home/rd/git/gestenergbook/code/dataEx2_0_c.csv"))
plotEx2_0_c=Plots.plot(
  data.Ano,Matrix(data[:,["Petrol+GNat","EnergRenov(Elet+Outros)"]]),
  framestyle = :box,
  xguidefontsize=14,
  xtickfontsize=14,
  xticks = [1988,1998,2008,2018],
  ylim=(0,100),
  ylabel="Percentagem do consumo total [%]",
  yguidefontsize=14,
  ytickfontsize=14,
  yticks = [0,20,40,60,80,100],
  lw=4,
  legend=:topleft,
  fg_legend = :transparent,
  legendfontsize=14,
  label = ["Petrol+GNat" "EnergRenov(Elet+Outros)"]
)

```



[Exercício resolvido 2.1]

[Exercício resolvido 2.1]

d) O gráfico da alínea b) mostra o efeito da política de diversificação da oferta, com a substituição desde os anos 1990 do petróleo por gás natural. Com base no gráfico da alínea c) verifica-se que até aos anos 2010, face ao aumento da oferta/ procura de energia, o efeito de políticas favorecendo as energias renováveis não se fazem sentir, mantendo-se constante o peso relativo dos combustíveis fósseis (petróleo e gás natural). Desde os anos 2010, os investimentos nas energias renováveis (eletricidade e outros) ganham expressão, observando-se o aumento do peso relativo destas energias de ~16% para ~27% do consumo total de energia.

— [Exercício resolvido 2.1] —

[Exercício proposto 2.2]

Com base nos balanços energéticos portugueses disponibilizados juntamente com os recursos deste documento, ver **Nota 0.1**:

a) Preencha os espaços vazios da tabela com valores de **energia final** nos anos 1998, 2008 e 2018 (os valores relativos a 1988 encontram-se pré-preenchidos).

[Relativo a Energ.Final]	1988	Δ [%]	1998	Δ [%]	2008	Δ [%]	2018
Consumo total [ktep]	11548						
Cons.Petr.Energético [ktep]	8027						
Cons.Petr.Energ./Total [%]	70	-		-		-	
Cons.Gás Natural [ktep]	0						
Cons.GásNat./Total [%]	0	-		-		-	
Cons.Eletric. [ktep]	1787						
Cons.Eletric./Total [%]	15	-		-		-	
[Prod.]Elet.Renov. [ktep]	1058						
Cons.Elet.Renov./Eletric. [%]	59	-		-		-	
Relativo a petróleo energético							
Cons.Transp.Rodoviário [ktep]	2750						
Cons.Transp.Rod./Petr.Energ. [%]	34	-		-		-	
Cons.Ind.Transf. [ktep]	1605(a)						
Cons.Ind.Transf./Petr.Energ. [%]	20	-		-		-	
Relativo a eletricidade							
Cons.Edifícios (b) [ktep]	828						
Cons.Edif./Eletric. [%]	46	-		-		-	
Cons.Ind.Transf. [ktep]	893						
Cons.Ind.Transf./Eletric. [%]	50	-		-		-	

a) No balanço energético de 1988 há que subtrair 1563 dos 3168 ktep para descontar o uso do petróleo como matéria prima nas indústrias química e de plásticos. Nos balanços energéticos de anos posteriores não existe esta necessidade.

b) Em “Edifícios” agrupam-se os setores doméstico (habitações) e de serviços.

- b) Faça um gráfico com a evolução dos consumos finais totais, de petróleo energético, de gás natural e de eletricidade.
- c) Faça um gráfico com a evolução percentual da produção de eletricidade renovável face ao total de eletricidade final consumida.
- d) Faça um gráfico com a evolução percentual do consumo de petróleo para transporte rodoviário e para a indústria transformadora, face ao total de petróleo (final) consumido.

[Exercício proposto 2.2]

[Exercício proposto 2.2]

- e) Faça um gráfico com a evolução percentual do consumo de eletricidade para edifícios e indústria transformadora, face ao total de eletricidade final consumida.
- f) Comente os gráficos obtidos nas alíneas anteriores relacionando-os com políticas energéticas implementadas.

[Exercício proposto 2.2]

3

Infraestrutura tecnológica

Um dos pilares da gestão da energia é identificado na Figura 1.8 como a tecnologia. Este pilar assenta em infraestruturas naturais, como os recursos disponíveis ou, ainda antes deste, nas leis que regem os mecanismos físicos dando suporte às trocas de calor e de trabalho. Neste capítulo descrevem-se os processos termodinâmicos que suportam a conversão de energia primária em calor e trabalho. Também se apresentam ferramentas que permitem avaliar a eficiência energética de processos, uma competência essencial no contexto da gestão da energia, não só para efeitos legais, como ainda para avaliar benefícios (económicos e para o ambiente) da otimização de processos.

3.1 Unidades de energia e fatores de conversão^[†]

Na física, as trocas de energia E assumem duas formas: trocas de energia sob a forma de trabalho, W , e trocas de energia sob a forma de calor, Q . Começamos por nos concentrar nas trocas sob a forma de trabalho.

Por trabalho podemos pensar na capacidade de levantar uma massa m uma altura Δh . Pensemos no “levantar” (no construir) uma parede de tijolos, um trabalho reconhecido não só sob esta definição física como ainda à luz da economia sendo, por isso, remunerável.

O trabalho para levantar um corpo de 0,102 kg uma altura de 1 m representa 1 J. Introduzindo a constante aceleração da gravidade $g = 9,807 \text{ m/s}^2$ tem-se,

$$W = w \cdot \Delta h = (m \cdot g)\Delta h = 0,102 \cdot 9,807 \cdot 1,000 = 1,000 \text{ J}, \quad (3.1)$$

onde $w = m \cdot g$ representa o peso.

Mais genericamente pode dizer-se, então, que trabalho (mecânico) é uma força F vezes um deslocamento Δl , onde F e Δl são grandezas que não estão limitadas a ser o peso (uma força que resulta da ação da gravidade) e uma altura (uma medida na vertical).

A troca de energia sob a forma de trabalho a que nos referimos está associada à cedência de energia de um corpo para outro. Por exemplo, a cedência de energia do trabalhador ao tijolo que é le-

[†] Na redação desta secção baseamo-nos em Zweifel et al. [2017, secção 2.1]

vantado e que numa posição mais alta possui um nível energético superior (ver-se-á já de seguida porquê).

Se existe transferência de energia, esta está acumulada numa qualquer forma. Nas trocas de energia que incidem no tijolo antes referido diz-se que existe um estado inicial de energia potencial $E_{p,1}$, energia associada à altura z_1 a que se encontra o tijolo e, um estado de energia final $E_{p,2}$, mais energético, relacionado com a cota mais elevada, z_2 . A variação de energia potencial $\Delta E_p = E_{p,2} - E_{p,1} = m \cdot g \cdot (z_2 - z_1)$ corresponde ao trabalho exercido sobre o tijolo.

Existe uma outra forma de energia mecânica; trata-se da energia cinética, E_c , energia associada a um corpo em movimento com uma velocidade v . Quando um corpo de massa m varia a sua velocidade transitando de um estado inicial para um estado final de velocidade é porque sobre ele se realizou um trabalho igual à variação da energia cinética, $\Delta E_c = 1/2 \cdot m \cdot (v_2^2 - v_1^2)$.

As unidades de energia potencial e energia cinética são tal qual trabalho, o Joule. Quando o trabalho realizado consiste em levantar ou acelerar um corpo diz-se mecânico, visto lidar com energia mecânica. Mas existem outras formas de armazenar energia. Alguns exemplos são:

- Energia química: Associada às ligações moleculares; sendo aquela que está contida nos combustíveis fósseis.
- Energia elétrica: contida nos campos eletromagnéticos.
- Energia térmica: Uma expressão da energia cinética dos átomos e moléculas de um corpo.
- Energia radiante: Associada à radiação emitida pelos corpos.
- Energia nuclear: Associada à massa dos elementos que constituem o núcleo de partículas elementares.

Porque o trabalho se revela como uma troca, um fluxo, é útil definir trabalho trocado na unidade de tempo. A esta grandeza de fluxo atribui-se a designação de potência \dot{W} (mecânica, se se estiver a realizar trabalho mecânico), sendo a unidade o watt [$1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$]. Tem-se a relação entre potência e trabalho,

$$\dot{W} = \frac{W}{\Delta t}, \quad (3.2)$$

onde Δt é um intervalo de tempo.

Se em lugar de energia mecânica usar energia elétrica o trabalho diz-se elétrico e a potência é também elétrica.

Perante a ubiquidade dos equipamentos elétricos na sociedade contemporânea, para a determinação do trabalho realizado mede-se a corrente elétrica i consumida—grandeza de fluxo—, a diferença de potencial $\Delta\phi$ —grandeza de diferença—e multiplicam-se estas grandezas (no caso de corrente contínua) obtendo uma potência, $\dot{W}_e = i \cdot \Delta\phi$.

A Figura 3.1 representa a medição no tempo da potência consumida por um equipamento elétrico. A potência sobe de zero a

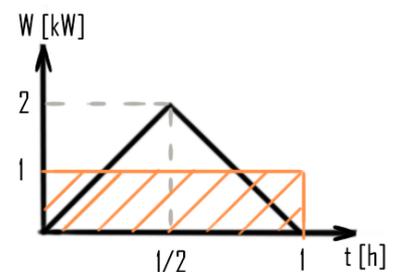


Figura 3.1: Diagrama de carga elétrico.

um valor máximo de 2 kW ao fim de meia hora, decrescendo de seguida até zero quando se atinge a hora. Nas abcissas da Figura 3.1 representa-se o tempo, expresso em horas e, nas ordenadas, a potência, expressa em kW. A Figura 3.1 inclui a linha assinalada a laranja que corresponde ao valor médio da potência consumida, $\bar{W} = 1$ kW. Resolvendo a Equação (3.2) em ordem a W conclui-se que a energia pode ser obtida de medições de potência no tempo como $W = \bar{W} \cdot \Delta t$, que em termos gráficos representa a área abaixo da curva $\dot{W} - t$. A área abaixo da curva é $1\text{kWh} \cdot 1\text{h} = 1\text{kWh}$.

Esta unidade é muito usada (os fornecedores de energia cobram energia nas habitações nesta unidade, por exemplo) e relaciona-se com a unidade do Sistema Internacional (S.I.), o joule, por,

$$1\text{kWh} = 1000\text{W} \cdot 3600\text{s} = 3,6 \times 10^6 \frac{\text{J}}{\text{s}} \cdot \text{s} = 3,6\text{MJ} . \quad (3.3)$$

No que diz respeito à energia térmica, historicamente, a unidade usada é a caloria (cal); correspondendo à energia necessária para elevar a temperatura de 1 g de água de 14,5 a 15,5°C. Por exemplo, para fundir 1 g de água (passar de gelo a água líquida) são necessárias 80 cal. Para evaporar 1 g de água à pressão atmosférica (a 100°C) são necessárias 539 cal.

Com se disse no início, energia pode ser transferida sob a forma de trabalho ou calor. Existe portanto equivalente entre a unidade de caloria e joule (afinal são ambos energia). Esta conversão é:

$$1\text{cal} = 4,187\text{kJ} . \quad (3.4)$$

Na Tabela 3.1 apresentam-se vários outros fatores de conversão [Zweifel et al., 2017, p.19].

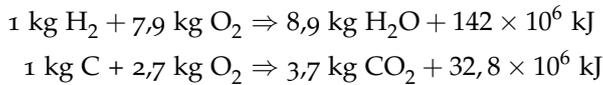
	MJ	kcal	kWh	tep	bbl	tec
1 MJ	1	238,8	0,2778	$23,88 \cdot 10^{-6}$	$175 \cdot 10^{-6}$	$34,14 \cdot 10^{-6}$
1 kcal	0,0042	1	0,00116	$0,1 \cdot 10^{-6}$	$0,73 \cdot 10^{-6}$	$0,143 \cdot 10^{-6}$
1 kWh	3,6	860	1	$86 \cdot 10^{-6}$	$630 \cdot 10^{-6}$	$123 \cdot 10^{-6}$
1 tep	41880	$10 \cdot 10^6$	11630	1	7,33	1,430
1 bbl	5713	$1,36 \cdot 10^6$	1587	0,1364	1	0,195
1 tec	29290	$6,995 \cdot 10^6$	8136	0,6995	5,127	1

Nesta tabela tep significa toneladas equivalentes de petróleo, bbl significa barril de crude e tec tonelada equivalente de carvão. Registe-se que as conversões apresentadas para estas unidades são “políticas”. Na Capítulo 5 detalhar-se-á este argumento, por ora refere-se, a título de exemplo, que na legislação portuguesa de eficiência energética na indústria se adota $1 \text{ kWh} = 215 \times 10^{-6} \text{ tep}$ em lugar dos $86 \times 10^{-6} \text{ tep}$ na Tabela 3.1.

No que diz respeito à energia química, como se referiu, esta está contida nas ligações entre as moléculas sendo libertada (em reações exotérmicas, as mais comuns) aquando da reação química. Por exemplo, na reação de combustão de hidrogénio observa-se

Tabela 3.1: Tabela de conversão de unidades de energia [Zweifel et al., 2017, p.19].

a libertação de 142×10^6 J; ao passo que para o carvão apenas se libertam $32,8 \times 10^6$ J. Com a combustão da hidrogénio liberta-se água, a combustão de carbono liberta dióxido de carbono.



Reações químicas—logo, utilização de energia química—também são a forma de energia usada por sistemas biológicos. A fotossíntese, por exemplo, é um processo de conversão de energia de radiação (solar) em energia química sob a forma de carboidratos que, de seguida, são distribuídos e usados no metabolismo celular.

Para o ser humano a atividade metabólica basal requer 80 W, aproximadamente. Considerando atividade sedentária, este valor sobe para entre 100 e 120 W. Ao fim de um dia (24 horas) a energia essencial à vida estará entre 2,4 e 2,9 kWh, ou seja, 2000 a 2500 kcal.

Estando a população humana estimada, em 2016, em 7,4 mil milhões de indivíduos, as necessidades nutricionais desta requer 5 mil milhões de toneladas biomassa (muita dela altamente concentrada na forma de carne e peixe). Comparando com o consumo de petróleo mundial, Zweifel et al. [2017, p.19] conclui que este consumo serviria para alimentar 4 vezes a população humana.

3.2 Rendimento energético

Alude-se na **Nota 3.1**, a taxas de produção de trabalho de animais muito superiores à do homem. Mas, simultaneamente, referiu-se o facto de os alimentos consumidos pelos animais serem menos energéticos. Uma forma de comparar prestações é determinar o rendimento energético, ou seja, determinar qual o trabalho produzido—no caso geral, qual a energia útil produzida—face à energia consumida. Rendimento, η_I , tem então a seguinte expressão,

$$\eta_I = \frac{\text{energia útil}}{\text{energia consumida}}. \quad (3.5)$$

Por exemplo, um indivíduo que produzisse 100 W de trabalho mas que precisasse (para suportar o metabolismo basal e atender a perdas) consumir 500 W, teria um rendimento de 20%.

A Equação (3.5) aplica-se a qualquer processo energético. Para a análise das máquinas térmicas—os ciclos a vapor que vieram substituir o trabalho animal e que estão na base dos processos que decorrem nas centrais termoelétricas—, é comum representar as trocas de trabalho e calor como na Figura 3.2.

A Figura 3.2 representa dois reservatórios térmicos, um a temperatura elevada T_H , outro a temperatura baixa T_C . O reservatório térmico a temperatura T_H fornece calor Q_H ao ciclo de vapor (numa caldeira) produzindo este trabalho (líquido) W (numa turbina). Como nem todo o calor Q_H é convertido em trabalho—imposição da 2ª lei da termodinâmica—, o calor remanescente Q_C é fornecido

Nota 3.1: A sociedade pré-industrial

Na tabela abaixo comparam-se valores de taxa metabólica para realização de trabalho (deduzido o metabolismo basal) por humanos e por animais. (fonte: <https://spark.iop.org/why-one-horsepower-more-power-one-horse>)

Animal	Massa[kg]	Pot.[W]
Homem	60-90	75
Mula	350-500	520
Boi	500-800	560
Cavalo	400-700	750

Compreende-se que um cavalo consegue realizar dez vezes mais trabalho que o homem, justificando-se o seu uso até ao advento da revolução industrial quando foi, progressivamente, substituído pelas máquinas a vapor. Equipamentos capazes de usar a energia química muito concentrada dos combustíveis fósseis.

Repare-se que o menor conteúdo energético dos alimentos (vegetais) usadas pelos animais, a par da maior potência por estes debitada, impõe muito maiores áreas de solo para pastagens. O ordenamento do território e a gestão de recursos numa sociedade pré-industrial era, por isso, forçosamente distinta.

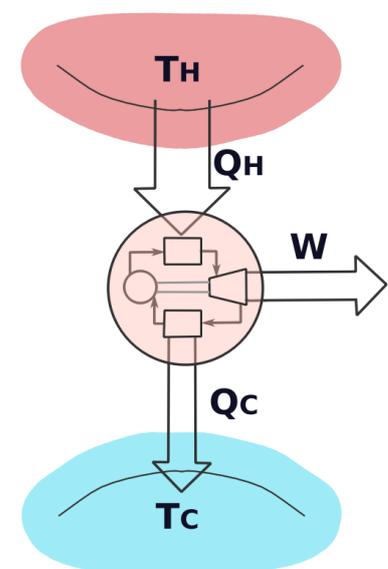


Figura 3.2: Ciclo de potência.

(num condensador) ao reservatório térmico a temperatura baixa T_C . O ciclo completa-se com o transporte da água condensada (por meio de uma bomba) para a caldeira.

Aplicando a expressão de rendimento a este ciclo—dito ciclo de potência—, a energia útil é o trabalho W e a energia consumida é Q_H . Como um balanço de energia no ciclo permite concluir $W = Q_H - Q_C$ obtém-se, aplicando a Equação (3.5) o rendimento,

$$\eta_I = \frac{W}{Q_H} = \frac{Q_H - Q_C}{Q_H} = 1 - \frac{Q_C}{Q_H}. \quad (3.6)$$

Repare-se que pela 2ª lei da termodinâmica $Q_C > 0$ logo, porque $Q_H > Q_C$, o rendimento de ciclos de potência é sempre inferior a 100%. Porém, quando se converte trabalho em calor o rendimento é de 100%. É devido a esta distinção entre rendimento na conversão de trabalho para calor e vice-versa que se diz serem trabalho e calor formas de energia com “qualidades” distintas, possuindo a energia sob a forma de trabalho maior “qualidade”.

O valor limite máximo do rendimento de ciclos de potência como os da Figura 3.2 é obtido quando se aplica o conceito de máquina reversível; uma máquina em que se verifica a igualdade,

$$\left. \frac{Q_C}{Q_H} \right|_{\text{rev}} = \frac{T_C}{T_H}. \quad (3.7)$$

Substituindo a Equação (3.7) na Equação (3.6) obtém-se o rendimento teórico máximo—ou rendimento de Carnot—de um ciclo de potência,

$$\eta_{I,\text{rev}} = 1 - \frac{T_C}{T_H}, \quad (3.8)$$

com as temperaturas T absolutas expressas em kelvin.

Apesar de, na prática, não existirem máquinas reversíveis, este conceito é muito útil para determinar o limite teórico do rendimento de ciclos termodinâmicos e quantificar quão afastado desse limite—quão ineficiente—é o processo real em estudo.

Existe um outro tipo de máquinas térmicas cíclicas cujo objetivo é transferir calor de um reservatório térmico a baixa temperatura T_C para outro a temperatura elevada T_H , contrariando deste modo o sentido natural da troca de calor do mais quente para o mais frio. Trata-se do ciclo frigorífico (frig) e da bomba de calor (bc).

A Figura 3.3 representa estes ciclos. Repare-se que os sentidos das trocas de energia na Figura 3.3 são inversos dos representados para o ciclo de potência na Figura 3.2. Ou seja, neste ciclo é consumido trabalho W para remover calor Q_C ao reservatório térmico a baixa temperatura e fornecer Q_H ao reservatório térmico a temperatura mais elevada. Como um balanço de energia ao ciclo da Figura 3.3 permite escrever $W = Q_H - Q_C$, resultam as expressões dos “rendimentos” dos ciclos⁹,

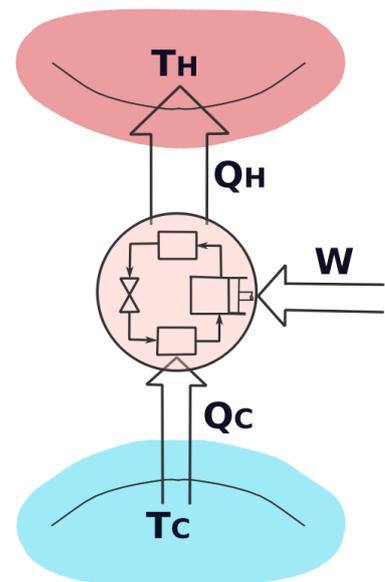


Figura 3.3: Ciclo frigorífico e bomba de calor.

⁹Repare-se ainda que, $\text{COP}_{bc} = \frac{W+Q_C}{W}$, logo, $\text{COP}_{bc} = 1 + \text{COP}_{\text{frig}}$.

$$\text{COP}_{\text{frig}} = \frac{Q_C}{W} = \frac{Q_C}{Q_H - Q_C} = \frac{1}{\frac{Q_H}{Q_C} - 1} \quad (3.9)$$

$$\text{COP}_{\text{bc}} = \frac{Q_H}{W} = \frac{Q_H}{Q_H - Q_C} = \frac{1}{1 - \frac{Q_C}{Q_H}} \quad (3.10)$$

As expressões 3.9 e 3.10 revelam a diferença entre ciclo frigorífico e bomba de calor. Enquanto o objetivo do primeiro é arrefecer o reservatório térmico à temperatura T_C removendo o calor Q_C , o último tem por objetivo aquecer o reservatório térmico à temperatura T_H fornecendo o calor Q_H .

Tal como para os ciclos de potência é possível conceber máquinas frigoríficas e bombas de calor reversíveis. Aplicando também neste caso a Equação (3.7) resultam os rendimentos máximos para máquinas reversíveis,

$$\text{COP}_{\text{rev,frig}} = \frac{1}{\frac{T_H}{T_C} - 1} \quad (3.11)$$

$$\text{COP}_{\text{rev,bc}} = \frac{1}{1 - \frac{T_C}{T_H}} \quad (3.12)$$

uma vez mais com as temperaturas T absolutas expressas em kelvin.

Salienta-se que para estes ciclos que não produzem trabalho—antes consomem trabalho—em lugar de rendimento se designa o indicador de desempenho do ciclo pelo acrónimo COP, coeficiente de desempenho (*Coefficient Of Performance*), tomando valores superiores a 100%.

[Exercício resolvido 3.1]

[Çengel and Boles, 2001, p.424] Uma máquina térmica (ciclo de potência) recebe calor de uma fonte a 1200 K à razão de 500 kW e rejeita calor para um meio a 300 K. A potência da máquina é de 180 kW. Determine a potência reversível e a irreversibilidade deste processo.

Resolução:

A potência reversível deste processo é a quantidade de potência que uma máquina térmica reversível (uma máquina de Carnot) produziria se funcionasse entre os mesmos limites de temperatura,

$$\dot{W}_{\text{rev}} = \eta_{\text{l,rev}} \dot{Q}_H = \left(1 - \frac{T_C}{T_H}\right) \dot{Q}_H = \left(1 - \frac{300}{1200}\right) \cdot 500 = 375 \text{ kW.}$$

Esta é a potência máxima de um ciclo de potência operando entre os limites dados de temperatura.

A irreversibilidade representa a diferença entre a potência reversível (potência máxima) e a potência (líquida) efetivamente debitada,

$$\dot{I} = \dot{W}_{\text{rev}} - \dot{W}_{\text{liq}} = 375 - 180 = 195 \text{ kW.}$$

[Exercício resolvido 3.1]

[Exercício resolvido 3.1]

Atenção: Independentemente da irreversibilidade acima observa-se que a quantidade de calor,

$$\dot{Q}_{C,rev} = \dot{Q}_H - \dot{W}_{rev} = 500 - 375 = 125 \text{ kW} ,$$

transferida para a fonte fria no ciclo reversível está *indisponível* para produzir trabalho, não devendo ser considerado irreversibilidade. Esta *indisponibilidade* é uma expressão da menor qualidade da energia térmica quando o objetivo é produzir trabalho. Voltar-se-á a este assunto na secção 3.5.

[Exercício resolvido 3.1]

3.3 *Balanço de energia*

Mas afinal que processos ocorrem nas máquinas térmicas, ciclos de potência, ciclos frigoríficos, referidos na secção anterior? Que ferramentas permitem o estudo destes processos de troca de calor e trabalho?

No caso geral é possível trocar energia de três modos: sob a forma de calor, sob a forma de trabalho e, ainda, energia associada ao escoamento de massa que entra e/ ou sai de um sistema.

Em sistemas fechados não ocorrem trocas de massa e apenas se observam trocas de calor e trabalho (as referidas na secção anterior). Começa-se por estabelecer as expressões que permitem analisar sistemas fechados.

3.3.1 *Sistemas fechados*

Considere-se o sistema fechado definido na Figura 3.4.

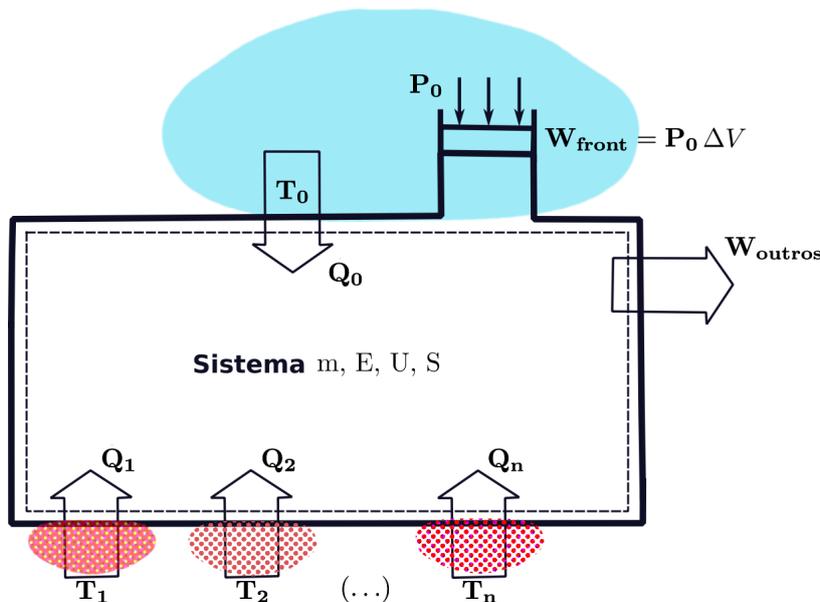


Figura 3.4: Sistema fechado que troca calor e trabalho com o exterior. O trabalho divide-se em trabalho de fronteira e outros.

Para o sistemas fechado representado o balanço de energia toma a forma,

$$\Delta E_{\text{sist}} = \sum_{i=0}^n Q_i + W, \quad (3.13)$$

com $W = W_{\text{front}} + W_{\text{outros}}$ a soma de trabalho de fronteira e de outro tipo¹⁰ e,

$$\Delta E_{\text{sist}} = \Delta U_{\text{sist}} + \Delta E_{c,\text{sist}} + \Delta E_{p,\text{sist}}, \quad (3.14)$$

a variação de energia no sistema.

Na Equação (3.14), ΔU_{sist} é a variação da energia interna no sistema; E_c e E_p são as energia cinética e potencial, como definido na secção 3.1.

Na Equação (3.13) as quantidades de calor Q e de trabalho W que atravessam a fronteira do sistema (sinal positivo quando entram e negativo quando saem) são determinadas por,

$$Q = \int \delta Q \quad (3.15)$$

$$W = \int \delta W, \quad (3.16)$$

onde os integrais inexatos realçam a dependência do trajeto concreto de transferência de calor e trabalho. Ou seja, ao contrário da energia do sistema, uma propriedade, que permite determinar a variação ΔE conhecidos os estados inicial e final (E_1 e E_2), calor e trabalho não são propriedades. Torna-se necessário conhecer, por exemplo, as funções $\dot{Q}(t)$ e $\dot{W}(t)$ para, após integração no tempo, obter,

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} \dot{Q}(t) dt \quad (3.17)$$

$$W = \int_{t_1}^{t_2} \dot{W}(t) dt. \quad (3.18)$$

[Exercício resolvido 3.2]

[Çengel and Boles, 2001, pp.119-120] Um tipo de trabalho comum em máquinas térmicas é o chamado trabalho de fronteira; por exemplo, aquele que resulta do deslocamento dz de um êmbolo de área A num cilindro devido à força $F = P \cdot A$ exercida por um gás à pressão P .

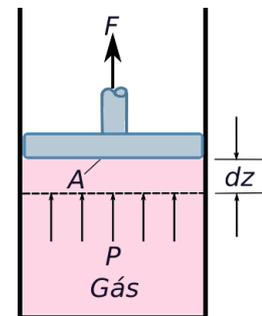
Para este caso considera-se,

$$\delta W = F \cdot dz = P \cdot A \cdot dz = P \cdot dV.$$

Admitindo $P = C \cdot V^{-i}$, com C uma constante e os volumes inicial e final V_1 e V_2 , respetivamente, determine as expressões para o tra-

[Exercício resolvido 3.2]

¹⁰Ver adiante o **Exercício resolvido 3.2** sobre o significado de trabalho de fronteira.



Trabalho de fronteira realizado por um conjunto cilindro-êmbolo.

[Exercício resolvido 3.2]

balho de fronteira W quando (a) $i = 0$, (b) $i = 1$ e (c) $i = n$, com $n > 1$.

Resolução

$$\text{a) } W = \int_{V_1}^{V_2} C dV = C \cdot (V_2 - V_1) .$$

$$\text{b) } W = \int_{V_1}^{V_2} \frac{C}{V} dV = C \ln \frac{V_2}{V_1} = P_1 V_1 \ln \frac{V_2}{V_1} .$$

$$\text{c) } W = \int_{V_1}^{V_2} \frac{C}{V^n} dV = C \frac{V_2^{-n+1} - V_1^{-n+1}}{-n+1} = \frac{P_2 V_2 - P_1 V_1}{1-n} .$$

Este exemplo comprova que apesar dos estados inicial e final não se alterarem, porque o trajeto percorrido é distinto nos três casos— a forma como a pressão variou entre V_1 e V_2 é distinta—, os trabalhos realizados são também distintos.

— **[Exercício resolvido 3.2]** —

Porque as máquinas térmicas se encontram em princípio sob ação da pressão atmosférica e possuem muitas vezes fronteiras móveis, é vantajoso distinguir entre trabalho de fronteira e trabalho de outros tipos. Atendendo ao **Exercício resolvido 3.2**, substituindo $W = \int P dV$ e a Equação (3.14) na Equação (3.13) (desprezando ΔE_c e ΔE_p) resulta,

$$U_2 - U_1 = Q - W_{\text{outros}} - P \cdot (V_2 - V_1) . \quad (3.19)$$

O sinal negativo dos trabalhos (fronteira e outros) resulta de se admitir que o sistema realiza trabalho sobre o exterior, ou seja, o trabalho sai do sistema. Considerou-se ainda a expressão para o trabalho de fronteira deduzida no **Exercício resolvido 3.2** quando $n = 0$ e $C = P$ (com P um valor de pressão constante).

Definindo entalpia por,

$$H = U + P \cdot V , \quad (3.20)$$

a Equação (3.19) pode ser reescrita na forma,

$$Q - W_{\text{outros}} = H_2 - H_1 = \Delta H . \quad (3.21)$$

Caso se considere energia interna e entalpia específicas $u = U/m$ e $h = H/m$ com m a massa do sistema, a Equação (3.20) toma a forma,

$$h = u + P v , \quad (3.22)$$

com $v = V/m$ o volume específico.

Para gases perfeitos, sendo $p\nu = RT$, uma expressão equivalente à Equação (3.22) é,

$$h = u + RT . \quad (3.23)$$

Valores de energia interna e entalpia específicos para diferentes materiais, pressões e temperaturas podem ser encontrados, por exemplo, em Çengel and Boles [2001].

Usando a definição de *calor específico a volume constante*,

$$c_v(T) = du/dT , \quad (3.24)$$

a Equação (3.21) pode ser reescrita (com $\Delta H = \int m(dh)$ e $dh = du$) como,

$$Q - W_{\text{outros}} = \int_{T_1}^{T_2} mc_v(T)dT = m \bar{c}_v \Delta T ,$$

com \bar{c}_v um valor médio de $c_v(T)$ entre os limites de temperatura T_1 e T_2 .

Por outro lado, em processos que decorrem a pressão constante, $dP = 0$, usando a definição de *calor específico a pressão constante*,

$$c_p = dh/dT , \quad (3.25)$$

a Equação (3.21) pode ser reescrita na forma,

$$Q - W_{\text{outros}} = \int_{T_1}^{T_2} mc_p(T)dT = m \bar{c}_p \Delta T .$$

Valores de c_v e c_p estão tabelados para diferentes materiais em Çengel and Boles [2001].

Para gases, aplicando a lei dos gases perfeitos tem-se a relação

$$c_p = c_v + R , \quad (3.26)$$

com R a constante do gás.

Para processos em sistemas fechados com materiais na fase líquida ou sólida é habitual desprezar variações de volume sendo $c_v = c_p = c$. Para sólidos, considera-se $\Delta h = \Delta u = \bar{c}\Delta T$. Para líquidos, tendo em consideração que,

$$dh = d(u + P\nu) = du + \nu dP + P d\nu = \bar{c} dT + \nu dP , \quad (3.27)$$

considera-se:

- Em processos isobáricos ($dP = 0$), $\Delta h = \Delta u = \bar{c}\Delta T$.
- Em processos isotérmicos ($dT = 0$), $\Delta h = \nu\Delta P$.

Consideremos um exemplo resolvido.

[Exercício resolvido 3.3]

Um depósito com 50 litros de água inicialmente a 15°C recebe durante 1 hora 500 W de calor observando-se perdas durante esse período de 180 W. Qual a temperatura final da água?

Resolução

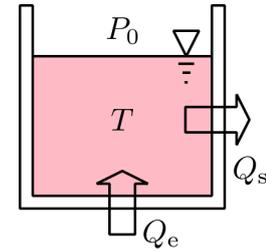
Trata-se de água na fase líquida. Inicialmente admite-se $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ e $\bar{c} = 4180 \text{ J/(kg K)}$.

Antes do mais importa recordar que potência térmica se relaciona com calor pela expressão $Q = \dot{Q} \cdot \Delta t$, com Δt o tempo decorrido em segundos. Como não existem trocas de trabalho de qualquer tipo; como se trata de um processo isobárico (a pressão é constante e igual à pressão atmosférica, P_0), a expressão de balanço de energia, Equação (3.21), toma a forma,

$$\begin{aligned} (\dot{Q}_e - \dot{Q}_s)\Delta t &= m(h_2 - h_1) \Leftrightarrow \\ (\dot{Q}_e - \dot{Q}_s)\Delta t &= m\bar{c}(T_2 - T_1) \Leftrightarrow \\ (500 - 180) \cdot 3600 &= 50 \cdot 4,180 \cdot (T_2 - 15) \Leftrightarrow \\ T_2 &= 20,5^\circ\text{C} . \end{aligned}$$

Agora que se conhece a temperatura final da água deve corrigir-se o valor de \bar{c} determinando o valor médio entre 15 e 20,5°C. Sucede que da consulta de tabelas se conclui que este valor pouco varia nesta gama de temperaturas, aceitando-se por isso o resultado obtido. Note-se que com o aquecimento o volume da água irá aumentar, realizando trabalho de fronteira. Porque a variação de volume (em líquidos) é mínima a aproximação $dh \approx \bar{c}dT$ é aplicável.

[Exercício resolvido 3.3]



Aumento de temperatura de um líquido por troca de calor.

3.3.2 Sistemas abertos

Em sistemas abertos para além das trocas de calor e trabalho já descritas há que contabilizar as trocas de energia devidas à massa que entra e que sai. A energia associada a estas trocas de massa relaciona-se com a velocidade do escoamento (energia cinética), a cota a que se observam as trocas (energia potencial) e a pressão do escoamento quando entra e/ ou sai. Esta última componente de energia de pressão pode ser determinada de modo análogo ao trabalho de fronteira, como descrito na secção anterior, no **Exercício resolvido 3.2**.

Considere-se o sistema aberto definido na Figura 3.5.

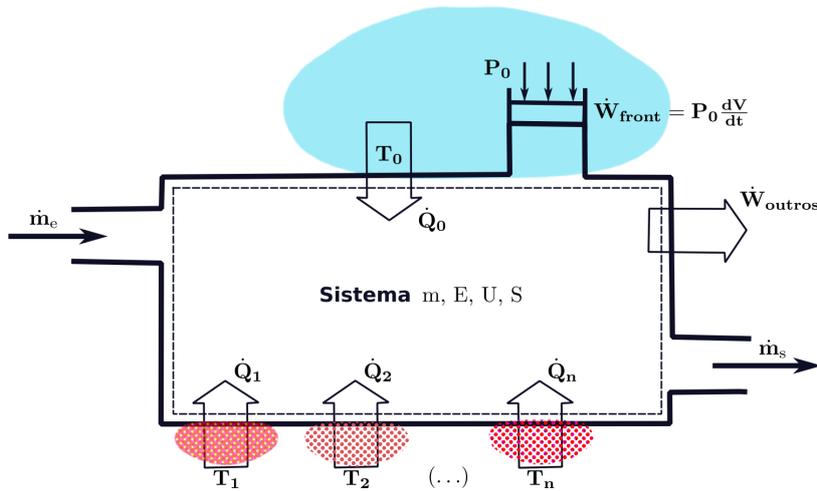


Figura 3.5: Sistema aberto que troca massa, calor e trabalho com o exterior. O trabalho divide-se em trabalho de fronteira e outros.

Os caudais \dot{m}_e e \dot{m}_s que entram e saem do sistema¹¹, respetivamente, são definidos como habitualmente por $\dot{m} = \rho \dot{V} = \rho v A e$, havendo apenas uma entrada e uma saída, $\dot{m}_e = \dot{m}_s = \dot{m}$.

Definindo θ como a energia específica contida no fluxo de massa que entra ou sai do sistema por,

$$\theta = u + Pv + e_c + e_p = h + e_c + e_p \quad (3.28)$$

e, com a variação na unidade de tempo da energia no sistema em análise definida por (desprezando variações de energia cinética e potencial do sistema),

$$\left. \frac{dE}{dt} \right|_{\text{sist}} = \left. \frac{d(mu)}{dt} \right|_{\text{sist}}, \quad (3.29)$$

tem-se a expressão de balanço de energia,

$$\left. \frac{dE}{dt} \right|_{\text{sist}} = \sum_{i=0}^n \dot{Q}_i \Big|_{\text{sist}} - \dot{W}_{\text{outros,sist}} - \dot{W}_{\text{front,sist}} + \dot{m}\theta|_e - \dot{m}\theta|_s, \quad (3.30)$$

onde se considera que ambos os trabalhos são realizados pelo sistema sobre o exterior (saem).

Na Figura 3.5 apenas se representou uma entrada e uma saída de massa no sistema. No caso geral de p entradas e $(q - p)$ saídas de massa—ver Figura 3.6—, para a resolução da Equação (3.30) há que ter em consideração a expressão de balanço de massa no sistema,

$$\left. \frac{dm}{dt} \right|_{\text{sist}} = \sum_{j=1}^p \dot{m}_{e,i} - \sum_{k=p+1}^q \dot{m}_{s,k}, \quad (3.31)$$

definindo dm/dt a acumulação de massa no sistema, no tempo.

¹¹Note-se que para além dos caudais mássicos há ainda que considerar a massa do sistema, $m|_{\text{sist}} = \rho V|_{\text{sist}}$.

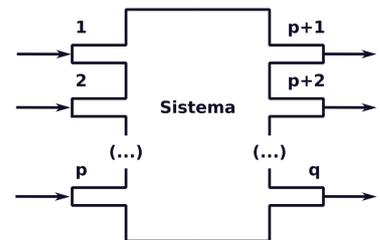
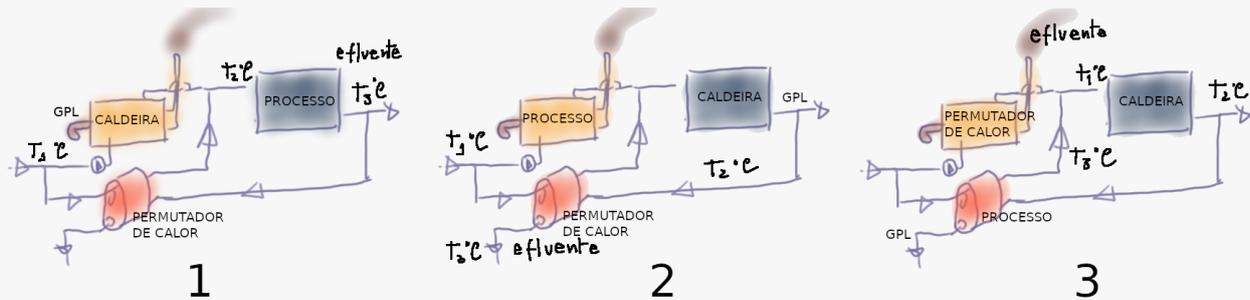


Figura 3.6: Sistema aberto com p entradas e $(q - p)$ saídas de massa.

Consideremos um exemplo resolvido.

[Exercício resolvido 3.4]

[Madeira-Costa, 2007] Numa empresa são aquecidos 2 m³/dia de água de 15 a 45°C, usando-se para isso gás propano (preço 22 EUR / 13 kg; PCI = 12,56 kWh/kg) e uma caldeira com um rendimento de 80%. Sabe-se que numa empresa situada no mesmo parque industrial é rejeitado um efluente a 55°C e que este efluente é tal que se poderia aproveitar todo o calor necessário, desativando a caldeira. Pretende-se avaliar o mérito dessa solução. Admita que a empresa labora 220 dias/ ano.



- Qual das figuras acima—[1/ 2/ 3]—representa o processo descrito com a substituição da caldeira por um recuperador?
- Qual o caudal de água a aquecer expresso em kg/dia?
- Calcule a energia térmica anual (expressa em kWh) necessária para aquecimento de água de 15 a 45°C.
- Calcule a massa de propano (expressa em kg) gasta para conseguir esse aquecimento.
- Determine a poupança anual (expressa em EUR) pela utilização do recuperador de calor.

Resolução

- A solução é a Figura 1, visto ser esta que representa adequadamente a caldeira onde entra água à temperatura $T_1 = 15^\circ\text{C}$ e GPL, de onde sai água à temperatura $T_2 = 45^\circ\text{C}$; representa o processo, de onde sai o efluente à temperatura $T_3 = 55^\circ\text{C}$ e, finalmente, representa o permutador de calor que aproveita a energia do efluente para se substituir à caldeira.
- $\dot{m} = \rho \dot{V} = 996 \cdot 2 = 1992 \text{ kg/dia}$. Com ρ obtido por interpolação das massas específicas da água à temperatura média entre $T_1 = 15^\circ\text{C}$ e $T_2 = 45^\circ\text{C}$.

c) Da Equação (3.30) tem-se

$$\frac{dE}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} + \dot{m}(h_e - h_s) .$$

Tratando-se do aquecimento de um líquido, $\Delta h \approx \bar{c}\Delta T$ e, substituindo na expressão acima resulta a potência $\dot{Q} = \dot{m}\bar{c}\Delta T = 1992 \cdot 4,180 \cdot (45 - 15) = 249,8 \text{ MJ/dia}$, com 4,180 kJ/(kg K) o calor específico (médio) da água. O consumo anual de energia resulta $Q = \dot{Q} \cdot \Delta t = 54956 \text{ MJ/ano}$, que, dividido por 3600 kJ/kWh, permite obter o resultado final, $E = 15266 \text{ kWh}$.

- Para determinar a massa de propano consumida na caldeira usam-se as expressões para o rendimento da caldeira $\eta_I = E_{\text{útil}}/E_{\text{consumida}}$ e $E_{\text{consumida}} = m_{\text{propano}} \cdot PCI_{\text{propano}}$. Obtém-se, $m_{\text{propano}} = 1519 \text{ kg}$.
- A poupança anual com a substituição da caldeira pelo recuperador de calor é obtida de $m_{\text{propano}} \cdot \text{preço}_{\text{propano}} = 2571 \text{ EUR/ano}$.

3.4 Balanço de entropia

Para além do balanço de energia (e de massa), na análise de máquinas térmicas importa realizar um terceiro balanço: O balanço de entropia.

Tal como nas secções anteriores, distinguem-se os casos de sistemas fechados e abertos.

3.4.1 Sistemas fechados

Para um sistema fechado apenas se observam trocas de calor e de trabalho através da fronteira do sistema. Na Figura 3.4, secção 3.3.1, representam-se estas trocas.

A segunda lei da termodinâmica aplicada à Figura 3.4 toma a forma,

$$\sum_{i=0}^n \frac{\delta Q_i}{T_i} \leq S_2 - S_1 \quad (3.32)$$

(1) (2)

onde S é a entropia e $\Delta S = S_2 - S_1$ a variação de entropia (no tempo). Ver-se-á de seguida que entropia é uma propriedade que se relaciona com U , H , T , P e V .

A Equação (3.32) mostra que a variação de entropia num sistema, o membro direito (2), é maior ou igual à entropia transferida, o membro esquerdo (1) da expressão.

Aproveitando o conceito de entropia gerada, S_{ger} , a Equação (3.32) pode escrever-se na forma,

$$S_{\text{ger}} = S_2 - S_1 - \sum_{i=0}^n \frac{\delta Q_i}{T_i} \quad (3.33)$$

com $S_{\text{ger}} > 0$, no caso geral e, no limite, $S_{\text{ger}} = 0$. Este limite corresponde a processos reversíveis—processos (idealizados) onde ocorrem trocas de calor sem geração de entropia.

Da aplicação conjunta das expressões de balanço de energia e entropia obtêm-se expressões para a entropia em função das restantes propriedades do sistema.

Considere-se a Equação (3.13) de balanço de energia para sistemas fechados. Desprezando os termos ΔE_c e ΔE_p tem-se, na forma diferencial,

$$dU = \delta Q_{\text{rev}} + \delta W_{\text{rev}} \quad (3.34)$$

Por balanço de entropia, considerando o caso com apenas uma troca de calor, por exemplo, apenas Q_0 na Figura 3.4, da Equação (3.32) para processos reversíveis tem-se,

$$\delta Q_{0,\text{rev}} = T_0 dS \quad (3.35)$$

Nota 3.2: Qualidade da energia

Repare-se que só as trocas de calor contribuem para o aumento da entropia—a Equação (3.32) não inclui qualquer referência a trocas de trabalho. É este efeito no aumento da entropia que distingue energia transferida sob a forma de calor e sob a forma de trabalho e que justifica associar diferentes “qualidades” a estas duas formas de energia. Trabalho, por não gerar entropia, é um modo de transferir energia com maior “qualidade”.

Substituindo a Equação (3.35) na Equação (3.34), com δW_{rev} o trabalho de fronteira exercido (que sai) sobre o ambiente exterior à pressão constante P_0 , resulta,

$$dU = T_0 dS - P_0 dV \Leftrightarrow T_0 dS = dU + P_0 dV . \quad (3.36)$$

Ou, admitindo propriedades específicas (de seguida não se representa o índice 0 por se analisar apenas uma troca de calor),

$$T ds = du + P dv . \quad (3.37)$$

Viu-se anteriormente que $h = u + Pv$ pelo que $dh = du + v dP + P dv$. Substituindo na Equação (3.37) obtém-se,

$$T ds = dh - v dP ; \quad (3.38)$$

ou,

$$ds = \frac{du}{T} + \frac{P dv}{T} \quad (3.39)$$

$$ds = \frac{dh}{T} - \frac{v dP}{T} . \quad (3.40)$$

Recordando as definições de calor específico a volume e pressão constante, Equação (3.24) e Equação (3.25), respetivamente, obtêm-se expressões para ds (válidas para sistemas fechados e abertos),

$$ds = c_v \frac{dT}{T} + \frac{P dv}{T} \quad (3.41)$$

$$ds = c_p \frac{dT}{T} - \frac{v dP}{T} . \quad (3.42)$$

No estudo de gases, considerando a expressão para gases perfeitos $Pv = RT$, com R a constante do gás (consultar valores em Çengel and Boles, 2001, por exemplo), das equações (3.41) e (3.42) resulta.

- Para gases perfeitos:

$$- ds = c_v \frac{dT}{T} + R \frac{dv}{v} . \quad (3.43)$$

$$- ds = c_p \frac{dT}{T} - R \frac{dP}{P} . \quad (3.44)$$

- Para líquidos e sólidos, com $dv \approx 0$ e $c_v = c_p = c$:

$$- ds = c \frac{dT}{T} . \quad (3.45)$$

Integrando as expressões (3.43) a (3.45) tem-se,

- Para gases perfeitos:

$$- s_2 - s_1 = \int_{T_1}^{T_2} c_v \frac{dT}{T} + R \ln \frac{v_2}{v_1} \approx \bar{c}_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{v_2}{v_1} . \quad (3.46)$$

$$- s_2 - s_1 = \int_{T_1}^{T_2} c_p \frac{dT}{T} - R \ln \frac{P_2}{P_1} \approx \bar{c}_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{P_2}{P_1} . \quad (3.47)$$

- Para líquidos e sólidos:

$$-s_2 - s_1 = \int_{T_1}^{T_2} c \frac{dT}{T} \approx \bar{c} \ln \frac{T_2}{T_1} . \quad (3.48)$$

Uma última expressão que ajuda a compreender a relação entre entropia e trabalho realizado por um sistema é obtida combinando as expressões (3.13) e (3.33) na forma diferencial,

$$dE = \sum_{i=0}^n \delta Q + \delta W ,$$

$$T_0 \delta S_{\text{ger}} = T_0 dS - T_0 \sum_{i=0}^n \frac{\delta Q_i}{T_i} .$$

Somando estas expressões obtém-se a seguinte equação para o trabalho realizado pelo sistema,

$$\delta W_{(W)} = \underbrace{(dE - T_0 dS)}_{(W_{\text{rev}})} - \sum_{i=1}^n \left(1 - \frac{T_0}{T_i}\right) \delta Q_i + \underbrace{T_0 \delta S_{\text{ger}}}_{(W_{\text{perd}})} . \quad (3.49)$$

A esta expressão pode ser dada a seguinte interpretação: o trabalho transferido para o sistema W (positivo, que entra) é igual ao trabalho reversível W_{rev} mais o trabalho perdido em irreversibilidades, W_{perd} . Este último, o “consumo adicional” ao trabalho reversível acima identificado.

Consideremos um exercício extraído de Bejan [1982, p.5].

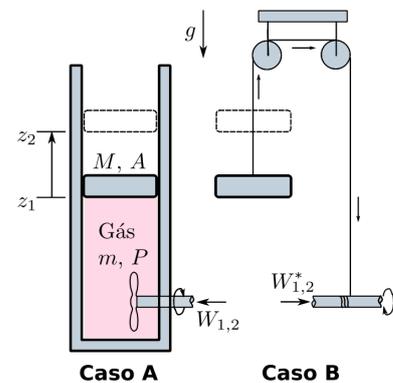
[Exercício resolvido 3.5]

Pretende-se comparar o trabalho realizado para içar um êmbolo usando (caso A) uma máquina térmica e (caso B) trabalho mecânico de rotação de um veio. A figura na margem representa os dois casos. Como descrito na Equação (3.33), a máquina térmica terá uma irreversibilidade associada. Pretende-se igualmente avaliar quantitativamente esta irreversibilidade.

A máquina térmica consiste de um conjunto cilindro-êmbolo adiabático—sistema fechado—, com área de secção transversal A , onde ocorre um processo de aquecimento de um gás (ideal) de massa m por movimentação de uma pá, desde o estado inicial 1 com propriedades T_1, P_1, V_1 até ao estado final 2 com propriedades T_2, P_2, V_2 . O êmbolo de massa M está sujeito à pressão atmosférica admitindo-se a temperatura ambiente aquela do estado inicial, T_1 . Com o aumento de temperatura do gás o êmbolo desloca-se da posição $z_1 = V_1/A$ até à posição final $z_2 = V_2/A$ mantendo-se a pressão no interior do cilindro constante e igual a $P_1 = P_2 = P = Mg/A$.

Resolução

Como a equação de balanço de entropia não inclui o termo de tra-



[Exercício resolvido 3.5]

[Exercício resolvido 3.5]

balho, na resolução deste exemplo é necessário usar as equações de balanço de energia e de entropia.

• Caso A:

$$\begin{aligned}
 - \text{Balanço de energia: } \Delta E_{\text{gás}} &= Q_{1,2} + W_{1,2} \Leftrightarrow (E_2 - E_1)_{\text{gás}} = \\
 &W_{\text{outro},1,2} - W_{\text{front},1,2} \Leftrightarrow W_{\text{outro},1,2} = [U_2 - U_1 + P(V_2 - V_1)] = \\
 &m\bar{c}_p(T_2 - T_1) = m(\bar{c}_v + R)(T_2 - T_1) = m\bar{c}_v(T_2 - T_1) + Mg(z_2 - \\
 &z_1) .
 \end{aligned}$$

Onde se considerou $Q_{1,2} = \int_1^2 \delta Q = 0$ (processo adiabático) e $W_{1,2} = \int_1^2 \delta W$ dividido no trabalho de fronteira (que sai do gás) realizado sobre o exterior, $W_{\text{front},1,2} = P(V_2 - V_1)$ e, outro trabalho (que entra; realizado sobre o sistema).

Para obter a última expressão usou-se $c_p = c_v + R$ e a equação dos gases perfeitos na forma $T = PAz/m/R$, com $P = Mg/A$.

Destaca-se o facto de o sistema consistir no gás e do trabalho de fronteira conter por via da relação $PdV = Mgdz$ a elevação do êmbolo de massa M .

$$\begin{aligned}
 - \text{Balanço de entropia: } S_{\text{ger}} &= S_2 - S_1 - \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} = m\bar{c}_p \ln \frac{T_2}{T_1} - \\
 &mR \ln \frac{P_2}{P_1} = m\bar{c}_p \ln \frac{T_2}{T_1} .
 \end{aligned}$$

Para chegar a este resultado considerou-se $\delta Q = 0$ e $P_2 = P_1$.

Refira-se que por desenvolvimento do logaritmo em S_{ger} se obtém a representação,

$$T_1 S_{\text{ger}} = m\bar{c}_p(T_2 - T_1) \frac{\ln(\chi+1)}{\chi},$$

com $\chi = (T_2 - T_1)/T_1$, que será útil adiante.

• Caso B:

$$- \text{Balanço de energia: } W_{1,2}^* = Mg(z_2 - z_1) .$$

$$- \text{Balanço de entropia: } S_{\text{ger}}^* = 0 .$$

Como $S_{\text{ger}}^* = 0$, conclui-se ser reversível o içar do êmbolo com o trabalho mecânico de rotação do veio. Observa-se neste modo de içar uma conversão de energia mecânica no veio em energia potencial. É simples imaginar a recuperação da energia de rotação com o baixar (por efeito da gravidade) do êmbolo.

Comparando $W_{1,2}$ e $W_{1,2}^*$, conclui-se precisar a máquina térmica mais trabalho para elevar o êmbolo. O consumo adicional foi $m\bar{c}_v(T_2 - T_1)$, estando esta quantidade relacionada com a entropia gerada no processo de conversão em calor do trabalho de rotação da pá; calor usado para aumentar a temperatura e expandir o gás, elevando o êmbolo.

[Exercício resolvido 3.5]

[Exercício resolvido 3.5]

Usando a expressão 3.49, com $\delta Q = 0$ obtém-se,

$$\delta W = \underbrace{(dE - TdS)}_{(W)} + \underbrace{T\delta S_{\text{ger}}}_{(W_{\text{rev}})} + \underbrace{T\delta S_{\text{perd}}}_{(W_{\text{perd}})},$$

com o termo W_{perd} traduzindo o “consumo adicional” ao trabalho reversível.

Para o presente exemplo, porque o processo é adiabático, $\int_1^2 TdS = \int_1^2 T\delta S_{\text{ger}}$, logo, $W_{1,2} = \Delta E$; expressão obtida no início da resolução. Comparando as expressões $T_1 S_{\text{ger}}$ e “consumo adicional” conclui-se que o trabalho perdido se relaciona com $T_1 S_{\text{ger}}$ pela expressão,

$$W_{\text{perd}} = \int_1^2 T_1 \delta S_{\text{ger}}$$

$$m\bar{c}_v(T_2 - T_1) = \left(\frac{\bar{c}_v}{\bar{c}_p} \frac{\chi}{\ln(\chi + 1)} \right) T_1 S_{\text{ger}}.$$

Comprova-se, então, ser o trabalho perdido proporcional à entropia gerada, com o coeficiente de proporcionalidade igual a \bar{c}_v/\bar{c}_p quando $\chi = 0$.

— **[Exercício resolvido 3.5]** —

3.4.2 Sistemas abertos

Recuperando a Figura 3.5 e, tendo em consideração que os fluxos de massa que entram e saem do sistema transportam consigo entropia para dentro do sistema e deste para o exterior, o balanço de entropia no sistema exprime-se (na forma diferencial) por,

$$\dot{S}_{\text{ger,sist}} = \frac{dS}{dt} \Big|_{\text{sist}} - \sum_{i=0}^n \frac{\dot{Q}_i}{T_i} \Big|_{\text{sist}} - \sum_j \dot{m}s|_{e,j} + \sum_k \dot{m}s|_{s,k} \geq 0. \quad (3.50)$$

Somando a expressão de balanço de energia 3.30 com $T_0 \dot{S}_{\text{ger}}$ obtido da Equação (3.50), obtém-se (com os termos negativos de potência, que saem, agrupados em \dot{W}),

$$\dot{W}_{(1)} = - \underbrace{\frac{d}{dt}(E - T_0 S)_{\text{sist}} + \sum_i \left(1 - \frac{T_0}{T_i}\right) \dot{Q}_i \Big|_{\text{sist}}}_{(2a)} + \underbrace{\sum_j \dot{m}(h - T_0 s)|_{e,j} - \sum_k \dot{m}(h - T_0 s)|_{s,k}}_{(2b)} - \underbrace{T_0 \dot{S}_{\text{ger}}}_{(3)}. \quad (3.51)$$

Porque no limite, quando se tem um processo reversível, o termo (3) da Equação (3.51) se anula ($S_{\text{ger}} = 0$), os termos (2a) e (2b) exprimem a componente reversível do trabalho realizado, \dot{W}_{rev} . Ou seja, a Equação (3.51) exprime a igualdade,

$$\begin{aligned} \dot{W} &= \dot{W}_{\text{rev}} - \dot{W}_{\text{perd}} \Leftrightarrow \\ \dot{W}_{\text{perd}} &= \dot{W}_{\text{rev}} - \dot{W} . \end{aligned} \tag{3.52}$$

Com

$$\dot{W}_{\text{perd}} = T_0 \dot{S}_{\text{ger}} \tag{3.53}$$

e

$$\dot{W}_{\text{rev}} = \dot{W}_{\text{max}} = \dot{W} + \dot{W}_{\text{perd}} . \tag{3.54}$$

Repare-se que na análise aqui apresentada se determina o *trabalho máximo* realizável pelo sistema (que sai), atendendo às transferências de energia (fixados os *inputs* e *outputs* de calor e massa). É esta a perspectiva usada na secção seguinte que desenvolve o conceito de exergia. Na secção 3.4.1, Equação (3.49) e no **Exercício resolvido 3.5**, a perspectiva foi diferente; aí, para as transferências disponíveis de energia determinou-se o *trabalho mínimo* a fornecer ao sistema (que entra). Ou seja. Dependendo do objetivo—trabalho que entra ou que sai—, o trabalho reversível pode corresponder ao mínimo requerido ou ao máximo realizável.

Os termos da Equação (3.51) podem ser representados graficamente num diagrama de Grassmann como se mostra na Figura 3.7. Neste tipo de diagramas os termos positivos no membro direito correspondem a entradas de energia no sistema e os termos negativos correspondem a saídas.

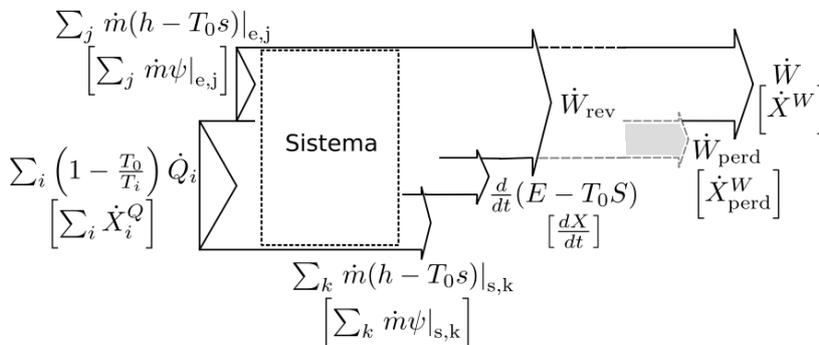


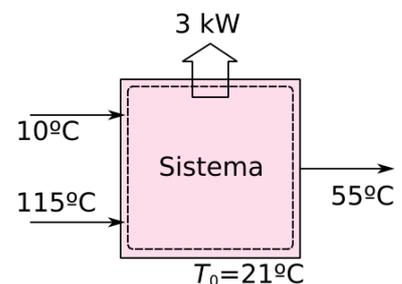
Figura 3.7: Diagrama de Grassmann representando entradas e saídas de energia num sistema aberto e evidenciando o trabalho perdido.

Vejam os exemplos de aplicação.

[Exercício resolvido 3.6]

[Çengel and Boles, 2001, p.460]: Numa câmara de mistura entra água a 10 kPa e 10°C, a uma taxa de 140 kg/min, onde é continuamente misturada com vapor de água a 10 kPa e 115°C. A mistura sai da câmara a 10 kPa e 40°C, e perde-se calor para o ar da vizinhança a 21°C, a uma taxa de 3 kW. Desprezando a variação de energia cinética e potencial, determine o trabalho reversível e o

[Exercício resolvido 3.6]



[Exercício resolvido 3.6]

trabalho perdido neste processo.

Resolução

Trata-se de um sistema aberto e de um processo em regime estacionário. Por conservação de massa e de energia determinam-se as massas de vapor que entra e de mistura que sai.

$$\text{Balanço de massa: } \dot{m}_{s,3} = \dot{m}_{e,1} + \dot{m}_{e,2}$$

$$\text{Balanço de energia: } \dot{Q}_s = \dot{m}_{e,1}h_{e,1} + \dot{m}_{e,2}h_{e,2} - \dot{m}_{s,3}h_{s,3} ,$$

Substituindo os valores das propriedades—ver tabela na margem obtida de Çengel and Boles, 2001, pp.904-908—resulta,

$$\dot{m}_{e,2} = 0,1161 \text{ kg/s} = 7,0 \text{ kg/min} .$$

Para determinar o trabalho reversível, da Equação (3.51) tem-se,

$$\dot{W}_{\text{rev}} = \dot{m}_{e,1}(h_{e,1} - T_0 s_{e,1}) + \dot{m}_{e,2}(h_{e,2} - T_0 s_{e,2}) - \dot{m}_{s,3}(h_{s,3} - T_0 s_{s,3}) .$$

onde, por se pretender o trabalho reversível se cancelou o termo de entropia gerada e, visto ocorrer a troca de calor à temperatura da fronteira $T = T_0 (= 294,15 \text{ K})$, cancela-se também o termo relativo à troca de calor.

Substituindo os valores das propriedades resulta,

$$\dot{W}_{\text{rev}} = -5,615 + 24,380 - (-2,036) = 20,801 \text{ kW} .$$

Porque no processo não se produz trabalho, o trabalho perdido (o trabalho potencial que se obteria com um ciclo de potência fictício) é a totalidade do trabalho reversível,

$$\dot{W}_{\text{perd}} \Big|_{\text{sai}} = T_0 \dot{S}_{\text{ger}} = \dot{W}_{\text{rev}} = 20,801 \text{ kW} .$$

Este resultado é revelador da elevada irreversibilidade decorrente de processos de mistura. A taxa de entropia gerada é,

$$\dot{S}_{\text{ger}} = \frac{20,801}{294,15} = 0,0707 \frac{\text{kW}}{\text{K}} .$$

Propriedade	Valor	Obs.
$\dot{m}_{e,1}$	2,3333 kg/s	–
$h_{e,1}$	42,01 kJ/kg	$h_f @ T_1$
$h_{e,2}$	2716,15 kJ/kg	–
h_s	167,57 kJ/kg	$h_f @ T_2$
$s_{e,1}$	0,1510 kJ/kg/K	$s_f @ T_1$
$s_{e,2}$	8,5200 kJ/kg/K	–
s_s	0,5725 kJ/kg/K	$s_f @ T_2$

3.5 Exergia

Exergia é um conceito que simplifica o significado dos termos nas expressões (3.51) e (3.49), definindo o trabalho potencial máximo que um processo pode produzir. Com base neste conceito torna-se possível definir rendimento *exergético*, mais adequado quando se pretende otimizar processos termodinâmicos.

A Tabela 3.2 resume o que se entende por exergia consoante a forma de energia.

Energia	Exergia respetiva
• Cinética	$x_c = e_c = \frac{v^2}{2}$
• Potencial	$x_p = e_p = gz$
• Trab.frenteira	$x_{Pv} = (P - P_0)v$
• Interna	$x_u = u - u_0 + P_0(v - v_0) - T_0(s - s_0)$
• Entalpia	$x_h = h - h_0 - T_0(s - s_0)$
• Sist.fechado	$\phi = (u - u_0) + P_0(v - v_0) - T_0(s - s_0) + v^2/2 + gz$
• Escoamento (total)	$\psi = (h - h_0) - T_0(s - s_0) + v^2/2 + gz$
• Transf.calor	$X^Q = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) Q$
• Transf.trabalho	$X^W = W$

Nota: Propriedades específicas representadas em letras minúsculas. O índice 0 representa condições do reservatório térmico de referência.

Repare-se que energia e exergia são iguais desde que não estejam envolvidas trocas de calor: casos da energia cinética, potencial, trabalho de fronteira e transferência de trabalho.

A Equação (3.49) para sistemas fechados reescrita com as definições de exergia acima toma a forma,

$$W = X^W = \Delta X - \sum_i X_i^Q + X_{\text{perd}}^W \quad (3.55)$$

A Equação (3.51) para sistemas abertos reescrita com as definições de exergia acima toma a forma,

$$\dot{W} = \dot{X}^W = - \left. \frac{dX}{dt} \right|_{\text{sist}} + \sum_i \left. \dot{X}_i^Q \right|_{\text{sist}} + \sum_j \dot{m}\psi|_{e,j} - \sum_k \dot{m}\psi|_{s,k} - \dot{X}_{\text{perd}}^W \quad (3.56)$$

No diagrama de Grassmann na Figura 3.7 incluem-se entre parêntesis retos os termos da Equação (3.56). A análise desta figura e da Equação (3.56) permite concluir que a presença do termo \dot{X}_{perd}^W impõe a diminuição da exergia em todos os processos (irreversíveis).

Tabela 3.2: Exergia para diferentes formas de energia.

A Figura 3.8 mostra este efeito para o caso da troca de calor em regime estacionário através de uma parede. Nesta figura representam-se dois meios a temperatura T_H e T_C diferentes ($T_H > T_C$). O gradiente de temperatura desenvolve uma transferência de calor \dot{Q} que atravessa a parede sendo, por conservação de energia, igual nas faces que contactam os meios H e C.

Da Equação (3.33), a entropia gerada pela troca de calor que entra na face da parede H e que sai na face C é (em regime estacionário $dS/dt = 0$),

$$\dot{S}_{ger} = -\dot{S}_{ger,H} + \dot{S}_{ger,C} = \left(\frac{1}{T_C} - \frac{1}{T_H} \right) \dot{Q},$$

um valor positivo visto $T_H > T_C$.

Da Equação (3.55) tem-se, por outro lado, a exergia perdida (com T_0 uma temperatura de referência),

$$\dot{X}_{perd}^W = \left(1 - \frac{T_0}{T_H} \right) \dot{Q} - \left(1 - \frac{T_0}{T_C} \right) \dot{Q},$$

um valor também positivo (e igual a $T_0 \dot{S}_{ger}$).

Recordando a Equação (3.8) do rendimento de um ciclo de potência reversível, conclui-se que as exergias que entram e saem da parede correspondem ao trabalho produzido por ciclos de potência operando entre T_H e T_0 e entre T_C e T_0 , respetivamente.

Aproveitando a análise que se fez da Figura 3.8, salienta-se a relação que existe entre o fluxo de calor que atravessa ambas as faces da parede, \dot{Q} , e as exergias, igualmente funções de \dot{Q} .

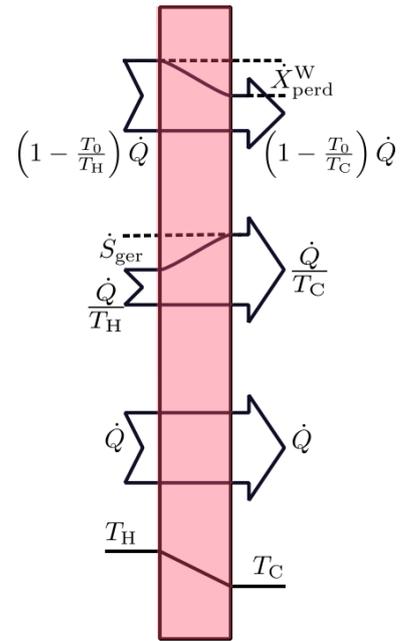


Figura 3.8: Transferência de calor, geração de entropia e perda de exergia num processo de troca de calor numa parede.

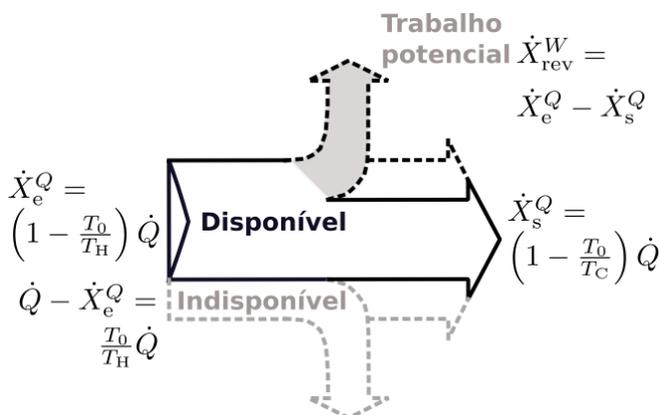


Figura 3.9: Diagrama de Grassmann identificando a energia indisponível para produzir trabalho reversível.

No diagrama de Grassmann da Figura 3.9 realça-se o facto de existir uma parcela $(T_0/T_H)\dot{Q}$ que permanecerá sempre indispo-

nível/ inacessível para produzir trabalho reversível \dot{X}_{rev}^W a partir do fluxo de calor \dot{Q} que entra na parede pelo meio H. Trata-se da parcela que, pela 2ª lei da termodinâmica, é perdida para a fonte fria. Identificar esta *indisponibilidade* é fundamental para entender o significado e interesse do conceito de rendimento exergético, η_{II} —introduzido na secção seguinte—, de onde se exclui a parcela indisponível no calculo do rendimento.

Vejamos um exemplo de aplicação.

[Exercício resolvido 3.7]

[Bejan, pp.29-30] Considere a figura na margem que representa esquematicamente uma turbina onde se produz trabalho ao veio. Admita regime estacionário. O trabalho máximo produzido no veio é,

$$\dot{W}_{veio,max} = \sum_j \dot{m}(h - T_0s)|_{e,j} - \sum_k \dot{m}(h - T_0s)|_{s,k} .$$

Este não é no entanto o trabalho máximo produtivo.

- a) Determine a expressão do trabalho máximo.
- b) Forneça uma interpretação física para a diferença entre o trabalho máximo e o trabalho máximo ao veio.
- c) Desenhe um diagrama de Grassmann com entradas e saídas de energia.

Resolução

a) Usando a Equação (3.56),

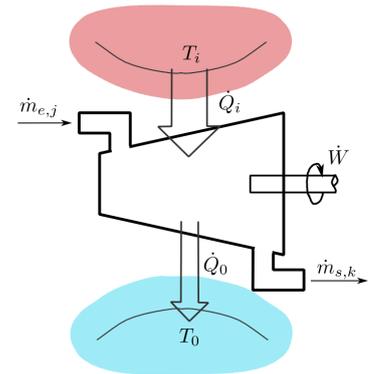
$$\dot{W}_{max} = -\cancel{\frac{dX}{dt}} + \sum_i \left(1 - \frac{T_0}{T_i}\right) Q_i + \sum_j \dot{m}(h - T_0s)|_{e,j} - \sum_k \dot{m}(h - T_0s)|_{s,k} - \cancel{\dot{X}_{perd}} .$$

onde se cancelam os termos de acumulação de exergia no sistema dX/dt , pois trata-se o regime estacionário, sendo o termo de perda de exergia nulo para o caso (reversível) a que corresponde o trabalho máximo pretendido.

b) O termo de diferença,

$$W_{max} - W_{veio,max} = \sum_i \left(1 - \frac{T_0}{T_i}\right) Q_i ,$$

traduz o trabalho produtivo por um ciclo de potência operando entre o reservatório térmico à temperatura T_i e o reservatório térmico

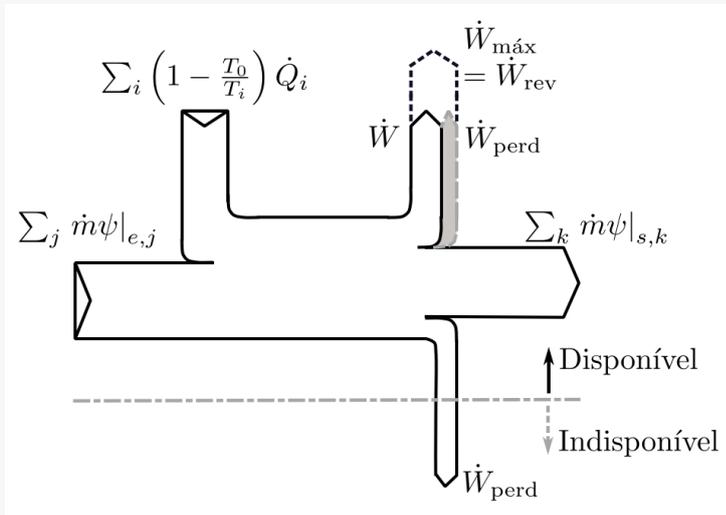


[Exercício resolvido 3.7]

[Exercício resolvido 3.7]

à temperatura T_0 .

c) A figura abaixo representa um diagrama de Grassmann.



Neste diagrama inclui-se uma quantidade de energia indisponível para produzir trabalho $\sum_i Q_i - \sum_i (1 - T_0/T_i) Q_i$, associada ao(s) ciclo(s) de potência fictício(s) a operar entre T_i e T_0 .

[Exercício resolvido 3.7] —

3.5.1 Rendimento exerético

Com base no conceito de exergia—de trabalho potencial—tem-se uma forma de avaliar quão próximo um equipamento ou processo está de produzir trabalho máximo, caso o objetivo seja produzir trabalho; ou, quão próximo está de consumir trabalho mínimo, caso o equipamento/ processo consuma trabalho. Define-se para esse efeito rendimentos exerético (representado por η_{II}) pelas expressões da Tabela 3.3

Aplicação	Expressão
Caso geral	$\eta_{II} = 1 - \frac{X_{\text{perd}}}{X_{\text{forn}}}$ ou $\eta_{II} = \frac{X_{\text{recup}}}{X_{\text{forn}}}$
Ciclos	
• Potência	$\eta_{II} = \frac{\eta_i}{\eta_{i,\text{rev}}}$ ou $\eta_{II} = \frac{W_{\text{liq}}}{W_{\text{rev}}}$
• Frigorífico e bomba de calor	$\eta_{II} = \frac{\text{COP}}{\text{COP}_{\text{rev}}}$ ou $\eta_{II} = \frac{W_{\text{rev}}}{W_{\text{liq}}}$
Máq.produz energ.	$\eta_{II} = \frac{W_{\text{liq}}}{W_{\text{rev}}}$
Máq.consome energ.	$\eta_{II} = \frac{W_{\text{rev}}}{W_{\text{liq}}}$
Permutador de calor	$\eta_{II} = \frac{X_{\text{recup}}}{X_{\text{forn}}} = \frac{\text{AumentExerg.FluxoFrio}}{\text{DecrescExerg.FluxoQuente}}$

Tabela 3.3: Expressões de rendimento exerético.

Na Figura 3.10 usam-se diagramas de Grassmann para elucidar a diferença entre balanço de energia e de exergia aplicados a um ciclo de potência.

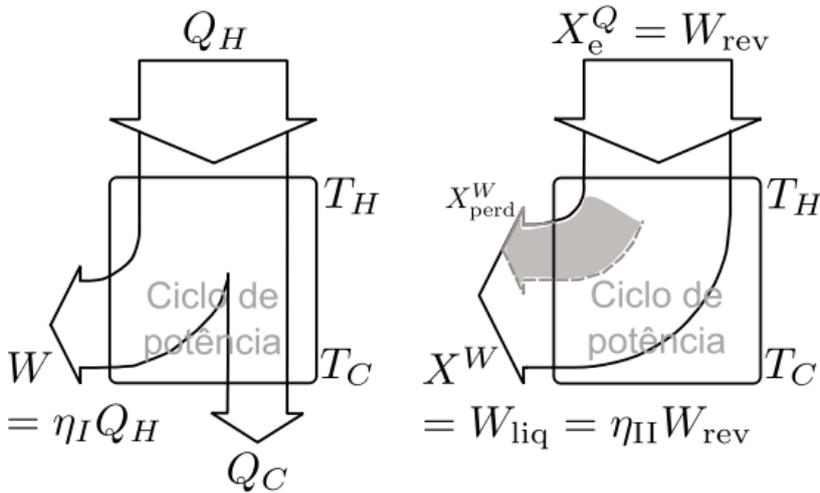


Figura 3.10: Diagramas de Grassmann elucidando diferença entre balanços de energia (esquerda) e de exergia (direita) de um ciclo de potência.

No balanço de energia, à esquerda da Figura 3.10, da Equação (3.13) resulta, $Q_H = Q_C + W$. Este diagrama evidencia as diferentes componentes em que a energia proveniente da fonte quente Q_H se transforma; incluindo-se a componente Q_C indisponível para realizar trabalho.

Para obter o balanço de exergia, à direita da Figura 3.10, usa-se o balanço de energia como acima e o balanço de entropia na forma da Equação (3.33). Combinando estas expressões resulta,

$$W = \underbrace{\left(1 - \frac{T_C}{T_H}\right) Q_H}_{(W_{rev}=W_{max})} - \underbrace{T_C S_{ger}}_{(W_{perd})} \Leftrightarrow$$

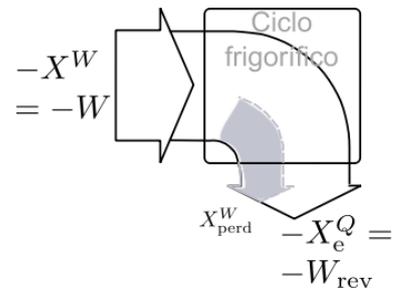
$$X^W = X_e^Q - X_{perd}^W .$$

Esta expressão mostra que o trabalho (líquido) realizado (que sai), W_{liq} , é igual ao trabalho reversível—a exergia da energia que entra, X_e^Q —menos o trabalho/ exergia perdida.

Repare-se como no balanço exergético não se inclui o termo X_s^Q relativo à exergia da energia indisponível, Q_C , perdida (que sai) para a fonte fria. O balanço de exergia releva a desagregação do trabalho reversível—trabalho potencial máximo—nas componentes de trabalho líquido e trabalho perdido.

Na margem apresentam-se os diagramas exergéticos para o ciclo frigorífico e bomba de calor. Salienta-se que se tratam de máquinas que consomem trabalho, razão pela qual o balanço de exergia releva o trabalho reversível—agora o mínimo—que permitiria a

Nota 3.3: Diagramas de Grassmann para balanço de exergia em ciclo frigorífico e bomba de calor

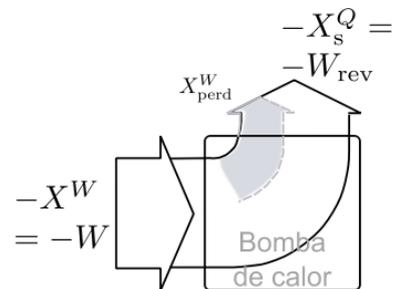


• **Frigorífico:** Baseado na equação,

$$-X^W = -X_e^Q - X_{perd}^W \Leftrightarrow$$

$$-W = -\left(\frac{T_H}{T_C} - 1\right) Q_C - T_C S_{ger} ,$$

com valores negativos representando trabalho que entra no sistema e X_e^Q a exergia (mínima) que é necessário repor na fonte fria a temperatura T_C para assegurar o funcionamento.



• **Bomba de calor:** Baseado na equação,

$$-X^W = -X_s^Q - X_{perd}^W \Leftrightarrow$$

$$-W = -\left(1 - \frac{T_C}{T_H}\right) Q_H - T_C S_{ger} ,$$

com X_s^Q a exergia (mínima) que é necessário repor na fonte quente a temperatura T_H para assegurar o funcionamento.

operação do equipamento; ou seja,

$$W = W_{\text{rev}} + W_{\text{perd}} \cdot (W_{\text{min}})$$

Na próxima secção resolvem-se vários exercícios sobre rendimento exergético.

3.6 Exercícios resolvidos e propostos

[Exercício resolvido 3.8]

Com base nos balanços energéticos portugueses disponibilizados juntamente com os recursos deste documento, ver **Nota 0.1**:

- a) Preencha os espaços vazios da tabela com valores de **transformação de energia primária** nos anos 1998, 2008 e 2018 (os valores relativos a 1988 encontram-se pré-preenchidos).

[Transf.Energ.Prim.para Novas formas de energia]	1988	Δ [%]	1998	Δ [%]	2008	Δ [%]	2018
Transf.NovasEnerg. (a) [ktep]	2300						
Termoeletricidade (b) [ktep]	876						
Rendim.CentraisTermoeletricas [%]	38	-		-		-	

a) No balanço energético de 1988 considerar a soma dos termos 1308, 828 e 164 ktep da linha “termo-eletricidade”. Nos restantes balanços energéticos considerar as somas dos totais de carvão, petróleo, gás natural e renováveis sem hídrica na linha “Eletricidade” de “Para novas formas de energia”.

b) No balanço energético de 1988 considerar 876 ktep (valor em módulo) na linha termo-eletricidade. Nos restantes balanços considerar o valor (em módulo) do total de eletricidade na linha “Eletricidade” de “Para novas formas de energia”.

- b) Comente a evolução do rendimento das centrais termoelétricas portuguesas.

Resolução:

a)

[Transf.Energ.Prim.para Novas formas de energia]	1988	Δ [%]	1998	Δ [%]	2008	Δ [%]	2018
Transf.NovasEnerg. (a) [ktep]	2300	114	4914	5	5156	-3	4989
Termoeletricidade (b) [ktep]	876	109	1835	27	2326	-7	2157
Rendim.CentraisTermoeletricas [%]	38	-	37	-	45	-	43

No preenchimento da tabela considerou-se, a título de exemplo, para o balanço energético de 2008, $5156 = 2445 + 476 + 264 + 1971$ ktep e $\eta_1 = 2326/5156 = 0,45$.

b) Observou-se um incremento do rendimento energético das centrais térmicas de ~38% nos anos 1980 para ~45% no presente. Repare-se no contributo do gás natural para a produção de eletricidade que substituiu o petróleo crescendo de zero em 1988, para 362 em 1998 e tendo estabilizado nos ~1900 nos anos 2000~2010. Com efeito, a introdução do gás natural em Portugal resultou na implementação de centrais termoelétricas mais eficientes de ciclo combinado.

[Exercício resolvido 3.8]

[Exercício resolvido 3.9]

Considere dois ciclos de potência, A e B, operando com o mesmo reservatório térmico frio à temperatura de 15°C, mas com reservatórios térmicos quentes às temperaturas $T_{H,A} = 100^\circ\text{C}$ e $T_{H,B} = 500^\circ\text{C}$. Admita que ambos os ciclos requerem 800 kW de calor e que ambos produzem 100 kW de trabalho.

- Qual a exergia—qual o trabalho potencial—produzido por cada ciclo em cada hora?
- Determine a irreversibilidade associada a cada ciclo.
- Compare rendimentos energético e exergético dos ciclos A e B.

[Exercício resolvido 3.9]

[Exercício resolvido 3.9]**Resolução:**

a) Na Figura 3.10 viu-se que num ciclo de potência o trabalho potencial do ciclo; o trabalho máximo/reversível ou, a exergia do ciclo, é a exergia associada à troca de calor na fonte quente,

$$X_e^Q = W_{\text{rev}} = \left(1 - \frac{T_C}{T_H}\right) Q_e .$$

Aplicando esta expressão aos ciclos A e B com $Q_e = Q_H = 800$ kWh (regime estacionário; período de 1 hora), resulta,

$$X_{e,A}^Q = \left(1 - \frac{15 + 273,15}{100 + 273,15}\right) 800 \Leftrightarrow X_{e,A}^Q = 182 \text{ kWh}$$

$$X_{e,B}^Q = \left(1 - \frac{15 + 273,15}{500 + 273,15}\right) 800 \Leftrightarrow X_{e,B}^Q = 502 \text{ kWh}$$

b) A irreversibilidade do ciclo contabiliza a diferença entre o trabalho potencial, caso se tratassem de ciclos reversíveis, e o trabalho (líquido) efetivo. Ambos os ciclos produzem, em 1 hora, $W_{\text{liq}} = 100$ kWh de onde resultam as irreversibilidades,

$$I_A = 182 - 100 = 82 \text{ kWh}$$

$$I_B = 502 - 100 = 402 \text{ kWh}$$

Porque $I_B \gg I_A$, conclui-se de imediato existir uma perda de exergia—um desperdício de trabalho potencial—muito superior no ciclo B. Com efeito, para produzir a mesma quantidade de trabalho, o desperdício é tanto menor quanto mais próxima for a temperatura da fonte quente da temperatura da fonte fria; neste exemplo, $T_{H,B} = 100^\circ\text{C}$ é a temperatura mais próxima de $T_C = 15^\circ\text{C}$. A lógica por detrás do evitar do desperdício é a seguinte:

A 2ª lei da termodinâmica impõe perdas, Q_C , para uma fonte fria. Vamos tentar que essas as perdas ocorram com o menor gradiente de temperatura possível, entre temperaturas tão próximas quanto possível de T_C , minimizando irreversibilidades por trocas de calor com diferenças de temperatura.

c) Usando a expressão $\eta_{II} = W_{\text{liq}}/W_{\text{rev}}$ da Tabela 3.3 obtém-se,

$$\eta_{II,A} = 100/182 = 0,55 = 55\%$$

$$\eta_{II,B} = 100/502 = 0,20 = 20\% ,$$

possuindo o ciclo A superior rendimento exergético—e estando, portanto, mais próximo do funcionamento ótimo.

Os rendimentos energéticos são iguais em ambos os ciclos (aplica-se a expressão 3.6),

$$\eta_{I,A} = \eta_{I,B} = \frac{W_{\text{liq}}}{Q_H} = 100/800 = 0,125 = 12,5\% .$$

Repare-se como este critério não destrinça os dois modos de funcionamento dos ciclos.

[Exercício resolvido 3.10]

[Çengel and Boles, 2001, p.429] Uma empresa anuncia a comercialização de pavimento radiante elétrico para habitações e que este têm um rendimento de 100%. Supondo que a temperatura interior das habitações é 21°C e a temperatura exterior 10°C, determine o rendimento exergético do pavimento radiante elétrico.

Resolução:

Obviamente, o rendimento a que a empresa se refere é o energético, que tem por base a conversão por efeito de Joule de 100% da energia (trabalho) elétrica em calor. Porque o objetivo é aquecer, a máquina térmica que permite o aquecimento (teórico) máximo é a bomba de calor reversível.

O COP de uma bomba de calor reversível operando entre os limites de temperatura indicados é,

$$\text{COP}_{\text{rev,bc}} = \frac{1}{1 - T_C/T_H} = \frac{1}{1 - 283,15/294,15} = 26,7 .$$

Conclui-se, então, ser o rendimento exergético do pavimento radiante elétrico (consultar Tabela 3.3),

$$\eta_{\text{II}} = \frac{\text{COP}}{\text{COP}_{\text{rev}}} = \frac{1,0}{26,7} = 0,037 = 3,7\% ,$$

onde se considerou para o pavimento radiante um rendimento, um COP, de 100%, ou seja, de 1.

Face ao resultado obtido conclui-se que à luz do rendimento exergético soluções de aquecimento que parecem energeticamente eficientes estão, na realidade, bem distantes de o ser.

[Exercício resolvido 3.10]

[Exercício resolvido 3.11]

Uma bomba de calor por compressão de vapor possui um COP de 4, recebendo 4 kW de calor do ar exterior a 0°C e aquecendo um espaço interior a 20°C. Determine o rendimento exergético do ciclo e compare-o com o COP.

Resolução:

O COP de uma bomba de calor reversível operando entre as temperaturas referidas é determinado pela Equação (3.12),

$$\text{COP}_{\text{rev}} = \frac{1}{1 - \frac{T_C}{T_H}} = \frac{1}{1 - \frac{273,15}{293,15}} = 14,66 .$$

Usando a expressão da Tabela 3.3 para o rendimento exergético, η_{II} , de uma bomba de calor, resulta,

$$\eta_{\text{II}} = \frac{\text{COP}}{\text{COP}_{\text{rev}}} = \frac{4}{14,66} = 0,27 = 27\% .$$

Repare que o COP de 4—ou seja, 400%—soa excelente. Mas, ainda assim, é apenas (aproximadamente) 1/4 daquele que se conseguiria com uma máquina reversível: É isto o que se conclui do resultado do rendimento exergético.

Acresce que para a operação da bomba de calor é indispensável trabalho elétrico; uma forma de energia “nobre”. Como vimos no **Exercício resolvido 3.8**, se esta energia for produzida em centrais termoelétricas, é penalizada pelo rendimento (energético) das centrais que não excede os ~ 40%. Contudo,

[Exercício resolvido 3.11]

[Exercício resolvido 3.11]

se for de origem renovável, o único ónus a considerar é o custo de desenvolvimento, uso e desativação da tecnologia empregue na obtenção da energia elétrica renovável.

No Capítulo 5 desenvolve-se um conceito—o custo acumulado de energia—que tem em linha de conta não só o custo da energia usada por um equipamento para laboração, mas considerando todo o ciclo de vida do equipamento, desde a sua construção e até este ser desmantelado.

[Exercício resolvido 3.11] –

– **[Exercício resolvido 3.12]** –

[Madeira-Costa, 2007] Uma tina preenchida com um fluido frio é mantida a 50°C através de um permutador de calor de 5 kW onde circula um fluido quente a 500°C . Ambos o fluido da tina e do permutador de calor são aquecidos desde os 15°C .

Calcule:

- O rendimento energético da permuta.
- O rendimento exergético da permuta.
- A exergia perdida em cada hora.
- Os rendimentos energético e exergético se se aquecesse a tina com uma resistência elétrica.

Resolução:

a) Em regime permanente, ao fim de uma hora, por conservação de energia no permutador, a energia térmica recebida do fluido frio e aquela fornecida ao fluido quente terão de ser iguais.

$$\eta_I = \frac{\text{Calor receb. fluido frio}}{\text{Calor forn. fluido quente}} = 5\text{kWh}/5\text{kWh} = 1 = 100\%$$

b) Começa por se realçar a semelhança entre a análise deste permutador e o estudo da transferência de calor através de uma parede na secção 3.5. Tendo em consideração o rendimento exergético em permutadores, por definição igual à razão entre a exergia recebida pelo fluido a temperatura inferior e a exergia fornecida pelo fluido a temperatura superior; admitindo que ambos os fluidos quente e frio são aquecidos desde a temperatura ambiente, os 15°C , resultam as exergias de entrada (fornecida pelo fluido quente) e saída (recebida pelo fluido frio) do permutador,

$$X_{\text{quent}}^Q = (1 - 288,15/773,15) \cdot 5 = 0,627 \cdot 5 = 3,135 \text{ kWh}$$

$$X_{\text{frio}}^Q = (1 - 288,15/323,15) \cdot 5 = 0,108 \cdot 5 = 0,542 \text{ kWh},$$

obtendo-se o rendimento exergético,

$$\eta_{II} = 0,542/3,135 = 0,173 = 17,3\% .$$

$$\text{c) } X_{\text{perd}}^W = 3,135 - 0,542 = 2,59 \text{ kWh.}$$

d) Sendo energia elétrica convertível em trabalho, a exergia associada à 1 J energia elétrica é também 1J. Este joule de trabalho é convertível na totalidade em calor. O rendimento energético do processo considerando o uso de resistência elétrica mantém-se nos 100%, tal como anteriormente.

No que diz respeito à exergia, observa-se a substituição do permutador pela resistência. A exergia associada ao aquecimento durante 1 hora com a resistência elétrica é $X_{\text{elet}}^W = 1 \cdot 5 = 5 \text{ kWh}$. Aproveitando a expressão de η_{II} e o valor de X_{frio}^Q da alínea (b), resulta o rendimento exergético,

[Exercício resolvido 3.12]

[Exercício resolvido 3.12]

$$\eta_{II} = 0,542/5 = 0,108 = 10,8\%$$

Note-se como com a resistência elétrica se obtém menor eficiência. Dito de outro modo, a exergia perdida—o potencial de trabalho perdido—com a resistência é superior àquele usando o permutador de calor.

É possível concluir que, sendo o objetivo aquecer, deve usar-se calor (a temperatura tão próxima quanto possível daquela a que se pretende aquecer) e *nunca* converter trabalho em calor.

— [Exercício resolvido 3.12] —

— [Exercício resolvido 3.13] —

[Çengel and Boles, 2001, p.422] Considere uma fornalha que pode fornecer, em regime permanente, calor a uma temperatura de 838°C e a uma taxa de 316,5 kW. Determine a exergia desta energia (desta transferência de calor). Admita que a temperatura ambiente é 25°C.

Resolução:

Como ponto prévio importa referir que em regime permanente o calor fornecido na fornalha é usado para manter a temperatura no seu interior, sendo também constante a taxa de calor perdido para o ambiente (fonte fria).

Repare-se que se pede a “exergia da energia” usada na fornalha; ou seja, o trabalho potencial que pode ser realizado com o calor transferido a 838°C. Admitindo a implementação de um ciclo de potência entre a temperatura a que o calor é fornecido e a temperatura ambiente, como se mostrou na Figura 3.10, a (taxa de) exergia associada aos 316,5 kW transferidos a 838°C é,

$$\begin{aligned}\dot{X}_e^Q &= \left(1 - \frac{T_C}{T_H}\right) \dot{Q}_H = \left(1 - \frac{25 + 273,15}{838 + 273,15}\right) \cdot 316,5 \\ &= 0,732 \cdot 316,5 = 231,7 \text{ kW} .\end{aligned}$$

Este valor corresponde ao trabalho potencial máximo—trabalho reversível—realizável com o calor fornecido; e representa 73,2% deste (os restantes 26,8% estão *indisponíveis*).

Mas, uma fornalha não é projetada para produzir trabalho. A perda de exergia será, então, total e, o seu rendimento exergético nulo. Uma questão que se pode colocar é: Como evitar a perda de exergia em fornalhas sabendo que são precisas temperaturas elevadas, por exemplo, em processos de têmpera de metais?

Uma solução sugerida pelo presente exercício consiste na utilização do calor do processo num ciclo de potência. Outra solução passa pelo aproveitamento *em cascata* do calor (noutros processos), de forma a minimizar gradientes de temperatura sempre que ocorrem trocas de calor. O **Exercício resolvido 3.4** apresenta um exemplo de aproveitamento de calor em cascata por via de efluentes de empresas localizadas num mesmo parque industrial (princípio de economia circular com reaproveitamento de resíduos).

Uma outra solução passa por perguntar: Será o processo que decorre na fornalha realmente necessário? Não existem materiais/ equipamentos que sirvam a mesma função produtíveis com menores gradientes de temperatura? A título de exemplo refere-se que, na natureza, se criam materiais com as mais variadas propriedades a temperatura ambiente.

— [Exercício resolvido 3.13] —

[Exercício resolvido 3.14]

[Çengel and Boles, 2001, p.425] Um bloco de ferro de 500 kg encontra-se inicialmente à temperatura de 200°C sendo arrefecido pela transferência de calor para o ar ambiente até ficar em equilíbrio com este a 27°C (admite-se o ar ambiente um reservatório térmico cuja temperatura não varia apesar do calor recebido do bloco). Determine o trabalho reversível e a irreversibilidade deste processo.

Resolução:

Na resolução deste exercício admite-se a existência de um ciclo de potência reversível a funcionar entre o bloco de ferro com temperatura $T_H(t)$ e o ar ambiente com temperatura T_C ; registando-se o facto da temperatura do bloco variar no tempo.

A energia térmica—o calor, Q_H —transferido pelo bloco de ferro é determinado pela expressão,

$$Q_H = m \cdot \bar{c} \cdot (T_{H,1} - T_{H,2}) = 500 \cdot 0,450 \cdot (200 - 27) = 38925 \text{ kJ},$$

onde, \bar{c} é o calor específico do ferro (kJ/kg/K, à temperatura média entre 200 e 27°C), $T_{H,1}$ e $T_{H,2}$ as temperaturas inicial e final do bloco.

O fluxo de exergia δX_e^Q associado ao calor transferido do bloco para o ar—a potência reversível; como se viu na Figura 3.10—variará no tempo. A integração deste fluxo de exergia entre instantes inicial e final toma a forma,

$$\begin{aligned} X_e^Q &= \int \left(1 - \frac{T_C}{T_H}\right) \delta Q_H = \int_{T_{H,1}}^{T_{H,2}} \left(1 - \frac{T_C}{T_H}\right) (-m \cdot \bar{c} dT_H) \\ &= m \cdot \bar{c} \cdot (T_{H,1} - T_{H,2}) - m \cdot \bar{c} \cdot T_C \cdot \ln \frac{T_{H,1}}{T_{H,2}}. \end{aligned}$$

Substituindo $\bar{c} = 0,45 \text{ kJ}/(\text{kg K})$, $T_{H,1} = 473 \text{ K}$, $T_{H,2} = T_C = 300 \text{ K}$ resulta,

$$X_e^Q = W_{\text{rev}} = 8191 \text{ kJ}.$$

Do resultado acima conclui-se que dos 38925 kJ de energia térmica—calor—transferidos do bloco de ferro para o ambiente, apenas 8191 kJ, ou seja, 21%, podem ser convertidos em trabalho.

Porque na realidade não se produz qualquer trabalho, a exergia é toda perdida, $X_{\text{perd}}^W = X_e^Q$, sendo a irreversibilidade do processo $I = X_e^Q (= W_{\text{rev}} - W_{\text{liq}}) = 8191 \text{ kJ}$.

[Exercício resolvido 3.14]

[Exercício resolvido 3.15]

[Çengel and Boles, 2001, p.426] O bloco de ferro discutido no exercício anterior é usado para manter a temperatura de uma casa nos 27°C quando a temperatura exterior é de 5°C. Determine a quantidade máxima de calor que pode ser fornecido à casa, à medida que o bloco arrefece até os 27°C.

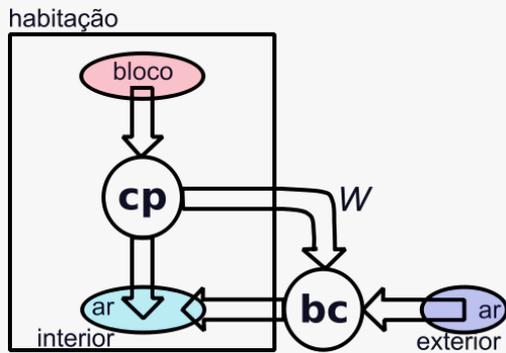
Resolução:

No exemplo anterior vimos que para além do calor transferido pelo bloco para o ar interior, determinado pela expressão $Q = m \cdot c_p \cdot (T_{H,1} - T_{H,2}) = 38925 \text{ kJ}$, no limite, seria possível produzir 8191 kJ de trabalho com um ciclo de potência reversível a operar durante o arrefecimento do bloco de ferro desde

[Exercício resolvido 3.15]

[Exercício resolvido 3.15]

os 200 até aos 27°C. Sendo o objetivo aquecer a casa podia-se aproveitar esse trabalho numa bomba de calor reversível e trazer calor do ar exterior a 5°C até ao ar interior a 27°C, como se mostra na figura.



O COP da bomba de calor reversível seria,

$$\text{COP}_{\text{rev,bc}} = \frac{1}{1 - T_{\text{ext}}/T_{\text{c}}} = \frac{1}{1 - 278/300} = 13,6 ,$$

com T_{ext} a temperatura do ar exterior.

Ou seja, a bomba de calor conseguiria fornecer 13,6 vezes mais calor do que o trabalho consumido. Neste caso, $8191 \cdot 13,6 = 111398$ kJ de calor. O potencial máximo de aquecimento do bloco de ferro seria, então, determinado pela soma do calor obtido pela bomba de calor com o calor transferido do bloco que não é usado para produzir trabalho,

$$(38925 - 8191) + 111398 = 30734 + 111398 = 142132 \text{ kJ.}$$

Porque nos cálculos realizados se admitiu o uso de máquinas reversíveis, não existem perdas de exergia sendo, portanto, a irreversibilidade zero.

4

Infraestrutura económica

No que à infraestrutura económica diz respeito, são muitas as ferramentas com aplicação à gestão da energia. As ferramentas referidas neste capítulo versam sobre a análise de investimentos não sendo específicas para a análise energética. Ainda assim, como se viu na secção 1.5, Tabela 1.3, os investimentos no setor da energia possuem particularidades, sendo possível modular esta secção realçando os aspetos de especial interesse para projetos na área da energia.

Uma das particularidades de investimentos no setor da energia é a extensão do horizonte temporal dos investimentos (20 ~ 30 anos ou mais). Com efeito, numa perspetiva macroeconómica, se pensarmos na dimensão e complexidade tecnológica de centrais termoelétricas, nos custos e incertezas associados a parques eólicos, compreende-se a importância de usar métodos de análise de investimento que permitam acudir ao risco associado aos longos tempos de vida do projeto.

Na perspetiva de uma pequena empresa ou até de uma família, os desafios tecnológicos são menores, mas se analisarmos com atenção podemos concluir que, proporcionalmente, os projetos permanecem avultados (em Portugal e no Brasil, o peso no orçamento familiar de isolar termicamente uma habitação, de substituir os envidraçados, por exemplo, não deixa de ser avultado para um agregado familiar com rendimento médio). Faz por isso todo o sentido, também na perspetiva microeconómica, o uso ferramentas de análise de investimento detalhadas.

Na presente secção abordam-se os seguintes temas:

- Fundamentos, com a introdução do conceito de Valor Atualizado Líquido (VAL) de um fluxo de poupanças ou despesas que se prolonga no tempo.
- A importância e fatores que condicionam a taxa de juro usada em investimentos.
- Considerações sobre a intervenção estatal em investimentos energéticos, em especial, através da definição de taxas de juro e subsídios.
- Que outras ferramentas (para além das discutidas nesta secção)

Nota 4.1: A legislação e as ferramentas de análise de investimento

A legislação portuguesa (SGCIE, para a indústria; RECS, para os edifícios de serviços) estipula o uso do período de retorno (*payback*) simples em análises de investimento. Na indústria, justifica-se o uso desta ferramenta caso se analisem investimentos em serviços, como são a iluminação, a produção de calor, a produção de ar comprimido; porém, na análise de investimentos no processo produtivo propriamente dito, é aconselhável usar instrumentos mais detalhados. Com efeito, o recurso a ferramentas mais detalhadas é reconhecido na legislação sobre cogeração e distribuição urbana de calor (ver Diretiva 2012/27/UE, Anexo IX, Parte 1), que estipula o uso do VAL na análise destes investimentos, tipicamente mais complexos e avultados.

podem ser usadas para análises mais aturadas.

- Nota sobre a distinção entre as perspetivas financeira e de conservação de energia na análise de investimentos.

4.1 Fundamentos

As técnicas de análise de investimento assentam na estimativa de fluxos de despesas e de rendimentos durante o período de duração do investimento. Pensando no investimento exigido numa central termoelétrica, por exemplo, caso se tratem de decisões de curto prazo como decidir se a central deve aumentar a taxa de produção, só importa considerar os custos diretos que decorrem dessa decisão. Para análise de investimentos de curto prazo, as componentes do custo a considerar são, meramente:

- Despesa adicional com combustíveis, aquisição de direitos de emissão de CO₂.
- Variação da despesa de manutenção devida à degradação da instalação com maior produção.
- Despesas adicionais devidas a arranques e paragens da instalação.

A soma destas despesas dividida pela produção adicional representa o custo marginal, e traduz o impacto económico no operador da central quando se varia a produção de uma unidade. Para a análise de curto prazo isto é suficiente. Já para uma análise de longo prazo, por exemplo, quando se pretende decidir sobre a reabilitação de uma central termoelétrica, os fluxos que importa considerar serão todos aqueles necessários incorrer durante a reabilitação. Tratando-se de um projeto com prazo significativamente mais longo, há que atender a fluxos de capital adicionais ocorridos no longo prazo do tempo do investimento.

Imaginando que a central possui uma capacidade \dot{W} [MW], que labora anualmente $\nu \cdot 8760$ h, o número de horas num ano afetado do fator ν que converte as condições reais de funcionamento da central ao longo de um ano (que inclui tempos de paragem, transitórios, etc.) numa percentagem média anual de tempo com a central a produzir em condições nominais; a produção elétrica anual W [MWh] é obtida de,

$$W = \dot{W}(\nu \cdot 8760) . \quad (4.1)$$

O volume de venda anual será, $p_E \cdot W$, onde p_E [EUR/MWh] é o preço da energia vendida.

Para conseguir as vendas a central incorre em despesas, separáveis em despesas fixas e variáveis. As despesas anuais variáveis D_v [EUR] incluem aquelas com matérias primas, aquisição de direitos de emissão de CO₂, tratamento de resíduos e despesas com pessoal

caso estas sejam variáveis. Dividindo despesas variáveis estimadas no período de investimento pela produção estimada obtém-se a despesa variável por unidade produzida, $d_v = D_v/W$ [EUR/MWh].

A despesa fixa, por seu turno, encontra-se definida num plano de investimento anual, sendo a razão entre despesas fixas e variáveis um indicador de quão intensivo em capital é o projeto de investimento.

Numa análise de investimento, o capital investido, incluindo o custo de financiamento, tem de ser comparado para a *duração do projeto*¹², T [anos], com os fluxos de caixa previsíveis ou, com a diferença entre vendas e despesas variáveis anuais. Numa análise simplificada assume-se que a totalidade do investimento I tem lugar no ano inicial t_0 , resultando num fluxo de caixa negativo nesse ano, I_0 . Nos anos seguintes os fluxos de caixa são determinados por,

$$A_t = (p_E - d_v) W|_t \tag{4.2}$$

com $t = 1, 2, \dots, T$.

Para se ter um investimento economicamente viável estes fluxos de caixa devem ser (predominantemente) positivos.

A Figura 4.1 traduz graficamente a análise de investimentos descrita. Representa um momento inicial t_0 em que se observa o investimento I_0 e, nos anos subsequentes mostra fluxos de caixa positivos (proveitos) A_t até ao ano T , a duração do projeto.

Porque o valor do dinheiro não é fixo no tempo, a avaliação, no presente, do valor de fluxos de caixa futuros deve ser feita após a sua atualização ao instante t_0 . A definição de *Valor Atualizado Líquido (VAL)*, definido como,

$$VAL = -I_0 + \sum_{i=1}^T \frac{A_i}{(1+i)^i} \tag{4.3}$$

exprime precisamente esta comparação entre investimento e fluxos de caixa atualizados ao instante t_0 (presente), os termos (1) e (2) do membro direito da Equação (4.3), respetivamente.

Na Equação (4.3) inclui-se uma taxa de juro¹³ (nominal, ajustada com a inflação), i , usada para *descontar* fluxos de caixa futuros. Com efeito, fluxos de caixa futuros possuem incerteza¹⁴ associada, logo, se, em vez de receber um fluxo de caixa $A_1 = A$ no ano t_1 o tivesse disponível no presente, em t_0 , poderia investir esse capital e obter $A(1+i)$ em t_1 , com um proveito adicional $A \cdot i$. Prosseguindo o raciocínio, se tivesse um fluxo de caixa devido em t_2 no presente, em t_0 , investindo esse capital obteria em t_2 um valor superior, $A(1+i)^2$. Por indução deduz-se a expressão de *fator de desconto* para um ano t : $(1+i)^t$.

Na Figura 4.2 apresenta-se a expressão para a capitalização de

¹²A duração do projeto depende dos objetivos e estratégia do investidor, mas encontra-se limitado pela natureza do produto/ serviço e pelo ciclo de vida dos equipamentos/ instalações, atendendo a critérios de obsolescência e durabilidade.

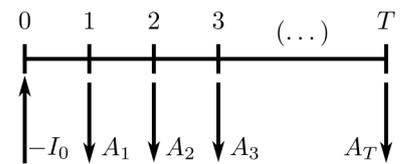


Figura 4.1: Plano de investimento e fluxos de caixa para a duração T do projeto.

¹³Admite-se que as taxas de juro associadas a empréstimos e investimentos são iguais, valendo i ; e que estas operações ocorrem sem custos adicionais.

¹⁴O provérbio popular afirma que mais vale um pássaro na mão do que dois a voar. Tomando o futuro como o “a voar” e o presente como “a mão”, o valor de dois passaros futuros, a voar, é menor do que um pássaro hoje, na mão.

um montante C_0 no presente a t anos; definindo o valor C_t , obtido da multiplicação de C_0 por $(1+i)^t$. Essa figura inclui, ainda, a operação inversa—a atualização—usada na definição do VAL. A atualização de um proveito futuro, C_t , ocorrido no ano t , corresponde no presente a ter C_0 , obtido de C_t a dividir por $(1+i)^t$.

Caso os fluxos de caixa sejam constantes para toda a duração do projeto, $A_t = A$ é uma constante e, atendendo à igualdade,

$$\sum_{i=1}^T \frac{1}{(1+i)^t} = \frac{(1+i)^T - 1}{i(1+i)^T}, \quad (4.4)$$

a expressão para o VAL toma a forma,

$$\text{VAL} = -I_0 + A \frac{(1+i)^T - 1}{i(1+i)^T}. \quad (4.5)$$

A aceitação de projetos de investimento está associada a valores VAL positivos.

Podem dar-se o caso de ser fácil estimar poupanças—que também designaremos de seguida por anuidades, A —sem conhecer em detalhe o investimento necessário, I_0 . Considerando a Figura 4.3, é possível determinar a capitalização das anuidades no instante T (no final da duração do projeto) a partir da soma das capitalizações das anuidades entre os instantes t_1 e T —ver Equação (4.6),

$$C_T = A \sum_{r=0}^{T-1} (1+i)^r = A \frac{(1+i)^T - 1}{i}. \quad (4.6)$$

Porque, como se mostra na Figura 4.2, se pode obter a atualização C_0 do valor C_T da expressão $C_0 = C_T / (1+i)^T$; substituindo nesta expressão a Equação (4.6) resulta,

$$C_0 = A \frac{(1+i)^T - 1}{i(1+i)^T}, \quad (4.7)$$

precisamente, o segundo termo do membro direito da definição do VAL, Equação (4.5).

Define-se limite de rendibilidade (ou período de amortização), R [anos], por,

$$R = C_0 / A = \frac{(1+i)^T - 1}{i(1+i)^T}. \quad (4.8)$$

Valores de limite de rendibilidade, R para diferentes T e i são apresentados na Tabela 4.1.

Conhecendo o limite de rendibilidade R e a anuidade (poupança), A , torna-se possível definir o valor do investimento que permite o equilíbrio financeiro do projeto, $I_0^{\text{eq}} = A \cdot R$; o caso com $\text{VAL} = 0$.

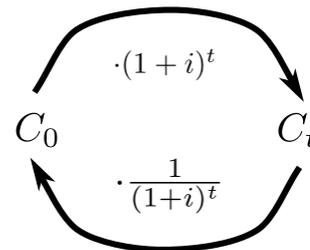


Figura 4.2: Relação entre capitalização e atualização.

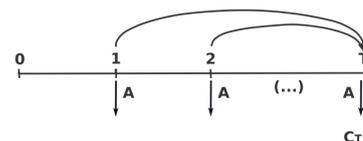


Figura 4.3: Capitalização de anuidades (proveitos) no ano T .

Ou seja, mesmo não conhecendo o investimento necessário realizar para obter as poupanças A , consigo estabelecer um teto máximo para esse investimento. Na posse desta informação, uma pesquisa de soluções existentes no mercado—a obtenção de propostas de fornecedores—permite de imediato uma estimativa da viabilidade do projeto justificando (ou não) evoluir para análises mais detalhadas.

Duração T [anos]	Taxa de atualização, i [%]						
	2	4	6	8	10	12	14
5	4,7	4,5	4,2	4,0	3,8	3,6	3,4
10	9,0	8,1	7,4	6,3	6,1	5,7	5,2
15	12,8	11,1	9,7	8,6	7,6	6,8	6,1
20	16,4	13,6	11,5	9,8	8,5	7,5	6,6
25	19,5	15,6	12,8	10,7	9,1	7,8	6,9

Tabela 4.1: Limites de rentabilidade [anos] para diferentes T e i .

Note-se que o inverso do limite de rentabilidade define um fator de recuperação de capital,

$$C_R = \frac{1}{R} = \frac{i(1+i)^T}{(1+i)^T - 1} \tag{4.9}$$

Este fator permite determinar a anuidade necessária para pagar o empréstimo de uma unidade monetária na duração T do empréstimo considerando a taxa de juro i . Usando a definição de C_R é possível exprimir o investimento inicial I_0 por uma sequência de fluxos de caixa negativos na duração do empréstimo, designado custo anual do capital (ver Figura 4.4).

$$i_c = I_0 \frac{i(1+i)^T}{(1+i)^T - 1} \tag{4.10}$$

Da Equação (4.10) resulta o preço p_E^{eq} que permite o equilíbrio financeiro do projeto,

$$p_E^{\text{eq}} = \frac{i_c}{W} + d_v \tag{4.11}$$

Quando se conhece o investimento I_0 e as anuidades A , resolvendo a Equação (4.8) com $C_0 = I_0$ em ordem a T determina-se o tempo decorrido até atingir o retorno do investimento; o equilíbrio financeiro, T^{eq} .

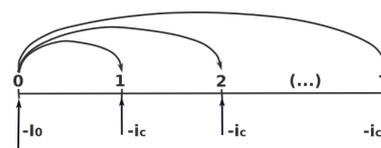


Figura 4.4: Custo anual do capital, i_c . Anualização de um investimento I_0 .

$$\frac{I_0}{A} = \frac{1}{i} - \frac{1}{i(1+i)^{T^{\text{eq}}}} \Leftrightarrow \ln\left(1 - \frac{iI_0}{A}\right) = \ln\left(\frac{1}{(1+i)^{T^{\text{eq}}}}\right) \Leftrightarrow$$

$$T^{\text{eq}} = -\frac{1}{\ln(1+i)} \ln\left(1 - \frac{iI_0}{A}\right). \quad (4.12)$$

Naturalmente, para um dado investimento I_0 , o tempo de retorno do capital varia inversamente com a anuidade.

Resolvendo a Equação (4.7) em ordem à taxa de juro i obtém-se a Taxa Interna de Rendibilidade (TIR), a taxa de juro para a qual se atinge o equilíbrio financeiro, ou seja, $TIR = i^{\text{eq}}$ (na nomenclatura inglesa designa-se *Return On Investment*, ROI).

Na Figura 4.5 apresentam-se curvas de VAL para diferentes taxas de juro i e diferentes durações de projeto T . Conclui-se que os valores de TIR (valores i quando $VAL = 0$, assinalados a vermelho) diminuíam significativamente—tornando o investimento menos interessante—quando se reduz a duração do projeto.

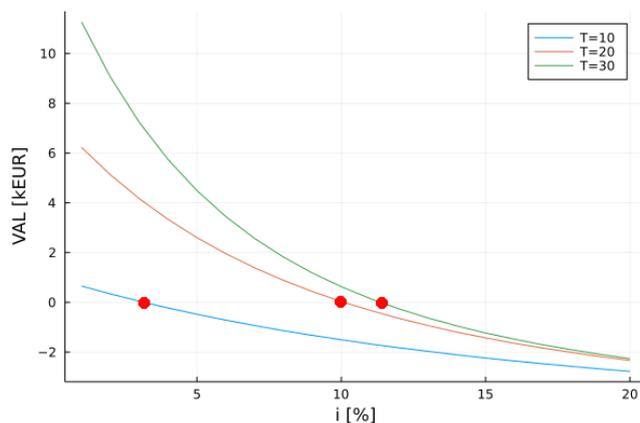


Figura 4.5: Valores de TIR para diferentes durações T de projeto. Admite-se (como em Zweifel et al. [2017]) $I_0 = 5500$ EUR e $A = 650$ EUR/ano.

— [Exercício resolvido 4.1] —

Considere entregas anuais de 100 EUR durante 20 anos e uma taxa de juro de 5% ao ano. Calcule:

- O capital final, C_T .
- O capital atual, C_0 .

Resolução:

- Usando a Equação (4.6):

$$C_T = 100 \frac{1,05^{20} - 1}{0,05} = 3307 \text{ EUR}.$$

[Exercício resolvido 4.1]

b) Usando a Equação (4.7):

$$C_0 = 100 \frac{1,05^{20} - 1}{0,05(1,05)^{20}} = 1246 \text{ EUR.}$$

Estes resultados devem ser comparados com
 $20 \times 100 = 2000 \text{ EUR.}$

— **[Exercício resolvido 4.1]** —

4.2 Significado de taxa de juro

Na secção anterior apresentaram-se ferramentas para a análise de investimentos; viu-se que estas dependiam da taxa de juro, i , mas não se abordou nem o significado nem os fatores que influenciam esta taxa.

A teoria económica define taxa de juro como o preço a pagar pelo capital por um determinado período de tempo. Admitindo um contrato com a duração de um ano, porque o credor fica sem acesso aos seus fundos na duração do contrato, é natural ter direito a uma compensação pelo risco em que incorre caso o devedor venha a incumprir o contrato. A definição da taxa de juro é definida pela lei do mercado atendendo à oferta e procura de capital. A oferta de capital deriva de poupanças ao passo que a procura resulta da necessidade de fundos por parte de empreendedores. Definida uma taxa q acima da qual os credores aceitem emprestar o seu capital, desde que a taxa de juro i oferecida pelos empreendedores sobre as poupanças exceda o valor q , os credores estarão disponíveis para se privar das suas poupanças pelo período de tempo acordado.

O valor TIR associado a um investimento é importante pois, no caso de equilíbrio entre oferta e procura, um projeto será financiável desde que $q = i = TIR$.

Para projetos de grande dimensão (construções de centrais nucleares, reestruturação de setor energético), a decisão de investir vai retirar do mercado por um período de tempo T capital que poderia ser usado para outros fins. Importa portanto que o valor atual líquido do projeto, descontado o juro devido ao credor, seja superior às consequências de ter deixado de estar disponível o capital no mercado. É óbvio que para projetos de grande dimensão o risco aumente tornando a análise do investimento mais complexa.

4.3 Taxa de juro ajustada à inflação

Em investimentos a longo prazo é muito importante contabilizar a taxa de inflação pois esta pode reduzir ou até anular o rendimento do credor.

Consideremos uma taxa de inflação (estimada) de h aplicável quer aos proveitos resultantes da venda de energia ao preço, p_E ,

quer às despesas variáveis unitárias, d_v . Se admitirmos taxa de inflação constante ao longo do horizonte temporal do projeto tem-se,

$$\begin{aligned} p_{E,t} &= p_E (1+h)^t \\ d_{v,t} &= d_v (1+h)^t, \end{aligned}$$

e, atendendo à relação entre estes e A ,

$$(p_{E,t} - d_{v,t})W (1+h)^t = A (1+h)^t. \quad (4.13)$$

Inserindo esta expressão na Equação (4.5) do VAL resulta,

$$\text{VAL} = -I_0 + A \sum_{t=1}^T \frac{(1+h)^t}{(1+i)^t}. \quad (4.14)$$

Na presença da taxa de inflação h importa distinguir entre taxa de juro nominal, i , e taxa de juro real, r , observando-se a relação (equação de Fisher),

$$(1+i) = (1+r)(1+h). \quad (4.15)$$

Mas da Equação (4.15) obtém-se,

$$\frac{1+i}{1+h} = 1+r. \quad (4.16)$$

Usando as expressões 4.16 e 4.14 obtém-se a expressão do VAL considerando a taxa de juro real r , refletindo o efeito da inflação,

$$\begin{aligned} \text{VAL} &= -I_0 + A \sum_{t=1}^T \frac{1}{(1+r)^t} \\ &= -I_0 + A \frac{(1+r)^T - 1}{i(1+r)^T}. \end{aligned} \quad (4.17)$$

Note-se ser habitual aproximar $(1+r)$ como definido na Equação (4.16) por¹⁵,

$$1+r = \frac{1+i}{1+h} \Leftrightarrow 1+r \approx 1+i-h, \quad (4.18)$$

¹⁵Atendendo à igualdade

$$\frac{1+x}{1+y} = \sum_{n=0}^{\infty} y^n (-1)^n (1-x)$$

com $|y| < 1$.

expressão válida quando $h \lesssim 10\%$.

Esta aproximação conduz à definição de taxa de juro real como,

$$r \approx i - h. \quad (4.19)$$

A inflação confere vantagem aos proprietários de bens materiais que veem o valor dos seus bens aumentar (o operador ou industrial que implementou a medida de poupança depara-se com atualizações C_0 superiores e incrementos do VAL). Porém, os credores são penalizados, vendo reduzir o valor do capital. Assim, se se esperar uma taxa de inflação de, por exemplo, $h = 3\%$ e, se o credor esperar uma valorização real do capital (com inflação) de, por exemplo, $r = 5\%$, pedirá uma taxa de juro nominal de $i = r + h = 8\%$ para compensar a redução de 3% devida à inflação.

[Exercício resolvido 4.2]

Se pedirmos 10000 EUR emprestados por 25 anos com uma taxa de juro de 5% ao ano (taxa líquida de inflação), qual será a anuidade a pagar se:

- a) Não existir inflação.
- b) Inflação de 3% ao ano.

Resolução:

- a) Pretende-se determinar i_c com $h = 0$ e a taxa de juro nominal $i = r + h = 5\%$. Usando a Equação (4.10):

$$i_c = 10000 \frac{0,05 \cdot 1,05^{25}}{1,05^{25} - 1} = 710 \text{ EUR}.$$

- b) Neste caso $h = 3\%$, logo, $i = r + h = 8\%$. Apresentam-se os resultados para i_c usando (i) a expressão exata (4.15) e (ii) a expressão aproximada (4.19):

i.

$$i_c = 10000 \frac{0,0815 \cdot 1,0815^{25}}{1,0815^{25} - 1} = 949 \text{ EUR}.$$

ii.

$$i_c = 10000 \frac{0,08 \cdot 1,08^{25}}{1,08^{25} - 1} = 938 \text{ EUR}.$$

Destes resultados conclui-se ser reduzida ($\sim 1\%$) a diferença entre os resultados exato e aproximado.

[Exercício resolvido 4.2]

4.4 Juros bonificados

Aproveita-se esta abordagem do valor do dinheiro para discutir, ainda que superficialmente, a oportunidade dos incentivos estatais a investimentos energéticos discutidos no Capítulo 2.

Como se referiu, os investimentos energéticos de longo prazo podem ter duração económica de 40 anos ou mais e, para esta

tipologia de investimentos, taxas de juro elevadas são muito penalizadoras. Face às incertezas no preço da energia é natural que investidores se queiram precaver. Isto constitui um desincentivo ao investimento deste tipo de projetos e, em última análise, pode representar um prejuízo para a sociedade. A questão que se levanta é saber decidir sobre se este tipo de investimentos—com proveitos para a sociedade¹⁶—deve beneficiar de taxas de juro *sociais/ambientais*, inferiores às praticadas no mercado.

Este tipo de incentivos é praticado na Europa e em Portugal para promover o desenvolvimento das energias renováveis e promover eficiência energética. Como se referiu no Capítulo 2, União Europeia e Estados-Membros criam linhas de financiamento específicas com taxas de juro bonificadas e disponibilizam subsídios a fundo perdido (comparável a taxas de juro negativas; caso em que o investidor oferece/ paga para emprestar o seu capital).

Obviamente, existem adeptos e detratores das *taxas de juro sociais*. Os detratores argumentam que se desvia deste modo fundos de outros setores importantes da sociedade e se compromete desta forma o bem estar de gerações futuras, sobrecarregando-as com dívida pública. Em Portugal, no início dos anos 2010, observou-se um intenso debate político precisamente sobre este tema; discutindo-se acesamente o malefício dos subsídios então atribuídos para o desenvolvimento da produção de energia renovável e a sobrecarga de impostos para os cidadãos que tais subsídios representavam.

¹⁶E, também, com proveitos para o meio ambiente.

4.5 Tópicos adicionais sobre prevenção do risco

A quantidade de riscos associados a investimentos energéticos de grande dimensão é imensa. Listam-se alguns exemplos [Zweifel et al., 2017]:

- Problemas técnicos (de engenharia) durante a construção;
- Problemas técnicos durante a operação;
- Falta de pagamento por parte de clientes ou redução da procura;
- Interrupção do fornecimento de matérias primas;
- Risco financeiro (variações nas taxas de juro, inflação, etc.);
- Risco associado a variações nos preços, a taxas de câmbio de moeda estrangeira;
- Riscos sociais;
- Riscos políticos.

Apesar desta lista ser assustadora e da probabilidade de materialização de algum destes riscos aumentar com o decorrer do projeto, a natureza humana fornece o impulso necessário para acreditar no sucesso e aceitar o risco. Este risco não precisa, contudo, de ser aceite de forma cega e as ferramentas descritas nas secções anteriores podem ser adaptadas para acautelar o risco.

Desde o final do século XX, companhias petrolíferas (e.g., BP) que têm na extração e comercialização de combustíveis fósseis o seu principal negócio anunciam avultados investimentos em energias renováveis. Esta estratégia para além de contribuir para "limpar" a imagem destas empresas (associada à poluição resultante dos combustíveis fósseis), revela prudência na gestão¹⁸.

Conclui-se que, para além de se contabilizar a incerteza associada a um investimento—aspecto detalhado na próxima secção—, também a diversidade de uma carteira de projetos é importante, sendo comum aceitar a integração em portfólios de investimento de projetos com valores esperados de TIR, VAL, etc. abaixo da média, desde que estes contribuam para a diversificação do portfólio.

¹⁸Vem a propósito o provérbio popular— Não ponhas todos os ovos no mesmo cesto.

4.5.1 Conceito de elasticidade

Uma forma de avaliação de risco financeiro de um projeto consiste em determinar a elasticidade—a sensibilidade—de um indicador económico (e.g., VAL) as variações nas variáveis que afetam esse indicador.

Recordando a Equação (4.5) conclui-se que o VAL se define num espaço que tem por base os parâmetros $\chi = \{I_0, A, i, T\}$. Se tomarmos um ponto de referência deste espaço, χ_0 , a variação do VAL por variação dos parâmetros χ em torno do ponto de referência pode ser determinada por,

$$\Delta \text{VAL}|_0 = \left. \frac{\partial \text{VAL}}{\partial I_0} \right|_0 \Delta I_0 + \left. \frac{\partial \text{VAL}}{\partial A} \right|_0 \Delta A + \left. \frac{\partial \text{VAL}}{\partial i} \right|_0 \Delta i + \left. \frac{\partial \text{VAL}}{\partial T} \right|_0 \Delta T. \quad (4.24)$$

Dividindo ambos os membros da Equação (4.24) por VAL e desenvolvendo as derivadas tem-se (para simplificar não se usa a notação "0", que recorda ser a expressão aplicável em torno de um ponto de referência), com R definido como na Equação (4.8),

$$\begin{aligned} \frac{\Delta \text{VAL}}{\text{VAL}} = & -\frac{I_0}{\text{VAL}} \left(\frac{\Delta I_0}{I_0} \right) + \frac{A \cdot R}{\text{VAL}} \cdot \frac{\Delta A}{A} \\ & - \frac{i}{\text{VAL}} \left[A \left(\frac{1}{i^2} - \frac{1}{i^2(1+i)^T} - \frac{T}{i(1+i)^{T+1}} \right) \right] \left(\frac{\Delta i}{i} \right) \\ & + \frac{T}{\text{VAL}} \left(\frac{A \cdot \ln(1+i)}{i(1+i)^T} \right) \cdot \frac{\Delta T}{T}, \end{aligned} \quad (4.25)$$

ou,

$$\frac{\Delta \text{VAL}}{\text{VAL}} = -e_{I_0} \frac{\Delta I_0}{I_0} + e_A \frac{\Delta A}{A} - e_i \frac{\Delta i}{i} + e_T \frac{\Delta T}{T},$$

definindo e_χ o coeficiente de elasticidade do VAL por variação do parâmetro χ .

Por exemplo, se se pretender avaliar a variação (percentual) do VAL por variação percentual apenas do parâmetro χ (mantendo os restantes parâmetros invariáveis), pode usar-se a expressão,

$$\frac{\Delta \text{VAL}}{\text{VAL}} = e_\chi \frac{\Delta \chi}{\chi}.$$

Reforça-se que esta variação e os coeficientes de elasticidade devem ser obtidos relativamente ao ponto de referência. Realça-se, também, a importância dos sinais (+) e (-) nos termos do membro direito da Equação (4.25); que assinalam crescimento (coeficiente de elasticidade e_χ positivo) ou decréscimo (coeficiente de elasticidade e_χ negativo) do VAL com o parâmetro χ considerado.

Conhecidos os coeficientes de elasticidade, e_χ , torna-se possível determinar valores de parâmetros χ^{eq} para os quais se atinge o equilíbrio financeiro de um projeto [Milanović and Dubonjić, 2005]. Recorre-se para tal à expressão,

$$\chi^{eq} = \chi \left(1 - \frac{1}{e_\chi} \right). \quad (4.26)$$

Consideremos um exemplo de aplicação.

— [Exercício resolvido 4.3] —

Analisa um projeto de investimento com as seguintes condições de referência:

$I_0 = 8000$ EUR, $A = 3000$ EUR, $i = 15\%$ e $T = 5$ anos.

Determine:

- O VAL do projeto nas condições de referência.
- Os coeficientes de elasticidade e_χ .
- Se se considerar uma variação nas anuidades A de -25% , qual a variação (relativamente ao ponto de referência) do VAL?
- Se o contrato de investimento permitir a variação da taxa de juro (nominal) em $+25\%$, qual variação (relativamente ao ponto de referência) do VAL?
- Usando a Equação (4.26) determine a anuidade que permite atingir o retorno do investimento (o equilíbrio financeiro) do projeto, A^{eq} .
- Usando a Equação (4.26) determine a taxa de juro (nomial) que permite atingir o retorno do investimento (equilíbrio financeiro) do projeto, i^{eq} .

Resolução:

- O VAL de referência para este projeto é determinado pela Equação (4.5) valendo, 2056 EUR.

[Exercício resolvido 4.3]

[Exercício resolvido 4.3]

- b) Substituindo na Equação (4.25) os parâmetros χ , R como dado pela Equação (4.8) e o valor do VAL determinado na alínea anterior, obtêm-se os coeficientes de elasticidade,

$$\frac{dVAL}{VAL} = -3,89 \left(\frac{dI_0}{I_0} \right) + 4,89 \frac{dA}{A} - 1,74 \left(\frac{di}{i} \right) + 3,38 \frac{dT}{T}.$$

- c) Se devido a fatores imprevistos as anuidades A reduzirem de -25% para 2250 EUR (mantendo-se os restantes parâmetros inalterados), a variação no VAL será de -122% ($= -25\% \cdot 4,89$), onde se usa o coeficiente de elasticidade e_A determinado na alínea b). O valor do VAL diminuirá para -452 EUR ($= 2056 \cdot (1 - 1,22)$); valor negativo, desaconselhando o investimento.
- d) Sendo permitidas variações da taxa i em $+25\%$ (aumentando para 18,75%), a variação no VAL será de $-43,5\%$ ($= -1,74 \cdot 25\%$), onde se usa o coeficiente de elasticidade e_i determinado na alínea b). O valor do VAL diminuirá para 1162EUR ($= 2056 \cdot (1 - 0,435)$).

A comparação deste resultado com aquele da alínea c) mostra que o VAL é menos sensível a variações na taxa de juro i .

- e) Usando a Equação (4.26), o valor A de referência e o coeficiente e_A determinado na alínea b) resulta,
 $A^{be} = A(1 - 1/e_A) = 3000(1 - 1/4,89) = 2386$ EUR.

Note-se que valores de anuidade inferiores a A^{be} resultam em valores negativos do VAL. Recuperando o caso da alínea c), porque a redução da anuidade de 25% resulta numa anuidade $A^{-25\%} < A^{be}$ ($= 2250\text{EUR} < 2386\text{EUR}$) conclui-se de imediato (sem mais cálculos) que se trata de um cenário indesejável com VAL negativo.

- f) Para a determinação da taxa de juro de *break-even* considera-se
 $i^{be} = i(1 - 1/e_i) = 15\%(1 - 1/(-1,74)) = 23,6\%$.

Taxas de juro superiores a i^{be} resultam em valores negativos de VAL. Recuperando a análise realizada na alínea d), porque com o aumento da taxa de juro em 25% se tem $i^{+25\%} < i^{be}$ ($= 18,75\% < 23,6\%$), deduz-se (sem mais cálculos) que o VAL se mantém positivo.

4.5.2 Outros modelos

Existem muitas outras metodologias úteis quando se analisam investimentos. Referem-se de seguida duas:

- Simulações Monte Carlo: onde se tem em conta as propriedades estocásticas dos parâmetros (variáveis independentes) χ que afetam a variável dependente, por exemplo, o indicador económico VAL. Ou seja, tem-se em consideração distribuições que melhor caracterizam as variáveis independentes (i.e., I_0, A, i, T) e covariâncias entre estas, determinando-se por amostragens sucessivas valores da variável dependente até se obter a distribuição desta. Pode então definir-se que o investimento será aprovado se a variável dependente tomar valores aceitáveis. Caso se analise o VAL, “valores aceitáveis” corresponderiam, por exemplo, a obter VAL positivo em 95% das situações (amostragens) consideradas.
- Árvores de decisão: onde se começa por definir todos os possíveis resultados do projeto e sequências de decisões (nós) e eventos (troços ou ramos) que a estas conduzem ou que destas derivam. Nesta árvore de eventos alguns nós são controláveis pelo investidor (por atos de gestão) enquanto outros não. Aos nós fora de controlo da gestão são associadas probabilidades de ocorrência permitindo à gestão escolher as intervenções nos nós sob controlo que maximizam o proveito do projeto. Este método—também designado de programação dinâmica (*dynamic programming*)—visa obter trajetos de decisão ótimos.

4.6 Diferença entre perspetivas financeira e de conservação de energia

Aquando da análise de um investimento podem surgir diferentes soluções técnicas. Do ponto de vista financeiro, a solução que interessa é aquela que permite produzir o bem ou prestar o serviço com o menor custo. Incrementos de investimento ΔI só se justificam desde que o incremento das receitas (ou a redução dos custos) o justifiquem.

Recordando a Equação (4.10) do custo do capital anualizado, do ponto de vista financeiro, pretende-se ter uma anuidade,

$$A = -\frac{\Delta I}{R} + p_E \Delta W > 0, \quad (4.27)$$

(1) (2)

com o termo (1) da equação a anualização do investimento adicional e o termo (2) representando o incremento das receitas (ou das poupanças) conseguido anualmente.

Resolvendo a inequação em ordem ao preço da energia, p_E , resulta,

$$\text{CEP} = \frac{\Delta I}{W} \frac{1}{R} < p_E, \quad (4.28)$$

com CEP o custo marginal da energia poupada que, não deve exceder o preço da energia praticada no mercado.

Consideremos o caso de um investimento num permutador de calor de placas. Do ponto de vista técnico, quanto maior a eficiência do permutador, η_I (ou η_{II}), melhor; porém, o aumento do preço (o investimento) não varia linearmente com o aumento da eficiência. Na Figura 4.6 apresentam-se valores de custo marginal da energia poupada *versus* eficiência do permutador, η_I .

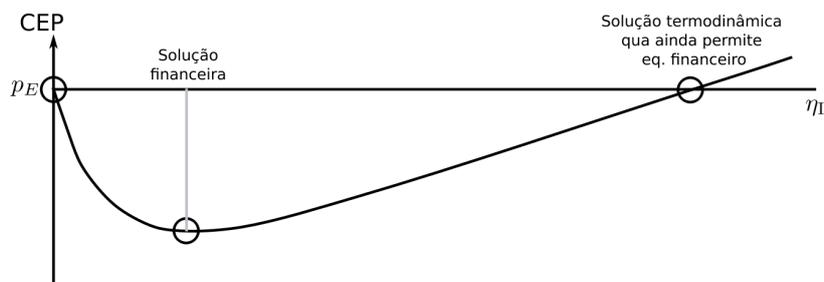


Figura 4.6: Solução ótima do ponto de vista financeiro e termodinâmico

Desta figura constata-se que a solução financeira fica aquém da solução termodinâmica que permite, ainda, o equilíbrio financeiro. Saliente-se, contudo—como se verá no capítulo seguinte—, que a diferença entre a solução financeira e termodinâmica tenderá a diminuir caso se considere um preço da energia que represente o real valor energético, atendendo à análise do ciclo de vida..

4.7 Exercícios resolvidos e propostos

— [Exercício resolvido 4.4] —

[Madeira-Costa, 2007] Recupere o **Exercício resolvido 3.4** sobre a empresa onde se analisa a substituição de uma caldeira por um permutador de calor (que aproveita o efluente de outra empresa no mesmo parque industrial). Tendo em consideração as respostas do **Exercício resolvido 3.4**, determine:

- Qual o custo máximo de um permutador recuperador que ainda justifica aproveitar o efluente, sabendo que o custo de oportunidade do capital para a empresa é 5% ao ano (líquido de inflação) e que a duração prevista é de 12 anos?
- Se o permutador custar 3000 EUR qual a poupança anual mínima?
- Para a poupança anual obtida no **Exercício resolvido 3.4** e, considerando o preço do permutador da alínea b), qual seria a rentabilidade para a empresa de investir no permutador recuperador?

Resolução:

- O custo máximo é obtido da expressão do limite de rentabilidade, $\frac{C_0}{A} = \frac{(1+0,05)^{12}-1}{0,05(1+0,05)^{12}}$ que, resolvida em ordem a C_0 com $A = 2571$ EUR/ano resulta, 22787 EUR.
- Para determinar a poupança mínima que justifica o investimento usa-se novamente a expressão $\frac{C_0}{A} = \frac{(1+0,05)^{12}-1}{0,05(1+0,05)^{12}}$, mas agora a incógnita é a poupança A e o custo C_0 é 3000 EUR. Resulta $A = 338$ EUR/ano.
- Para determinar a rentabilidade do investimento com uma poupança anual $A = 2571$ EUR/ano e um custo do recuperador de calor de $C_0 = 3000$ EUR, resolve-se a expressão $\frac{3000}{2571} = \frac{(1+i)^{12}-1}{i(1+i)^{12}}$ em ordem a i . A solução pode ser obtida numericamente, resultando, 0,856 = 85,6%.

— [Exercício resolvido 4.4] —

— [Exercício resolvido 4.5] —

[Madeira-Costa, 2007] Considerando como duração de um envidraçado 50 anos e uma taxa de atualização de 2,943% ao ano, qual das três soluções descritas na tabela abaixo é a mais rentável?

	Custo invest. [EUR]	Custo invest. anualiz.	Energ. aquecim. [EUR/ano]	Custo total anualiz.
Vidro simples	500		200	
Vidro duplo	1300		100	
Vidro triplo	2500		60	

Preencha as colunas da tabela com os custos de investimento anualizados e o custo total anualizado. A energia para aquecimento gasta anualmente corresponde a um custo de exploração podendo ser estimada usando um programa de modelação do comportamento térmico dos edifícios, tendo em consideração condições dos ambientes interior e exterior.

Resolução:

Aplicando as expressões para o vidro simples, a título de exemplo:

- limite de rentabilidade, $R = \frac{(1+0,02943)^{50}-1}{0,02943 \cdot (1+0,02943)^{50}} = 26,01$ anos
- $i_c = \frac{500}{26,01} = 19,2$ EUR/ano
- $C_t = 19,2 + 200 = 219$ EUR/ano

— [Exercício resolvido 4.5] —

[Exercício resolvido 4.5]

Reproduzindo estes cálculos para os vidros duplo e triplo obtém-se,

	Custo invest. [EUR]	Custo invest. anualiz.	Energ. aquecim. [EUR/ano]	Custo total anualiz.
Vidro simples	500	19,2	200	219
Vidro duplo	1300	50,0	100	150
Vidro triplo	2500	96,1	60	156

A solução adotada é a que apresenta menor custo total anualizado, ou seja, o vidro duplo, com 150 EUR/ano.

— **[Exercício resolvido 4.5]** —

[Exercício resolvido 4.6]

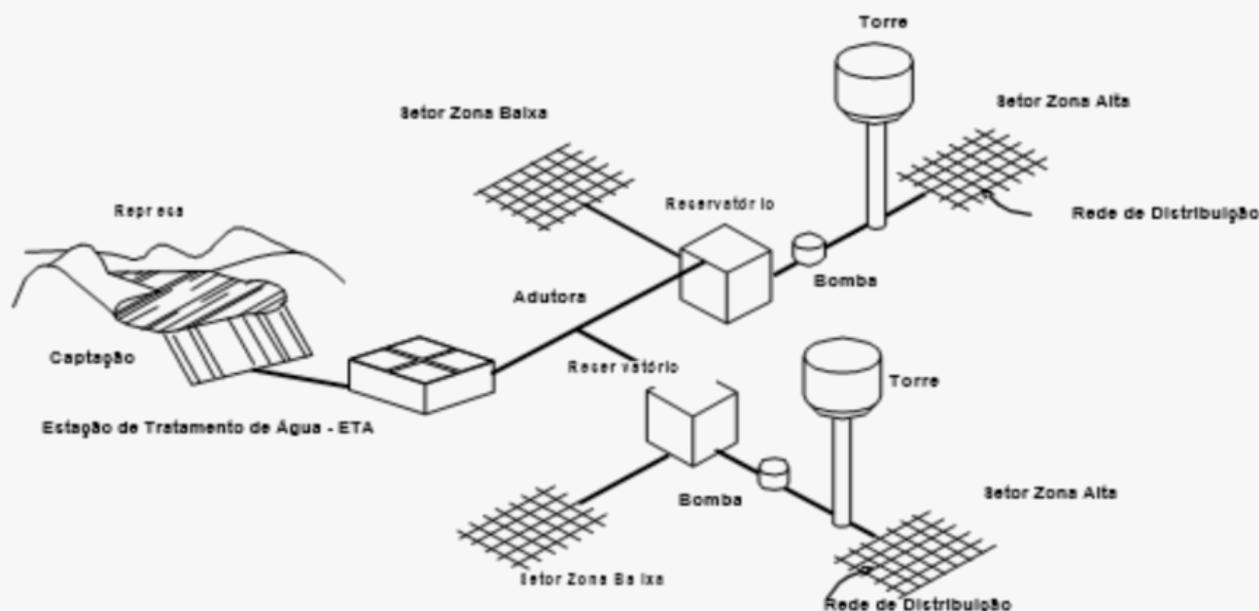
[Cavique-Santos, 2012] Pretende-se dimensionar uma rede de distribuição de água. Na figura abaixo [adaptada de Lousada and et al., 2019] exemplifica-se um sistema completo de abastecimento de água que compreende redes de distribuição de água.

O custo da rede é uma função do diâmetro da tubagem. Quanto maior o diâmetro D maior será o investimento inicial I_0 .

Admita-se a função linear,

$$I_0 = c_0 + c_1 D,$$

com c_0 e c_1 constantes.



Para além do investimento inicial, a rede terá associadas despesas de exploração, nomeadamente, a energia necessária para movimentar a água. Esta energia é uma função da perda de carga linear j nas tubagens definida como,

$$j = \left(k \frac{V^n}{D^m} \right), \quad (*)$$

— **[Exercício resolvido 4.6]** —

[Exercício resolvido 4.6]

uma função do caudal volúmico escoado \dot{V} e, ainda, do diâmetro D (k , n e m constantes).

Mas repare-se que nesta expressão (*) a perda de carga varia inversamente com o diâmetro, ou seja, se se reduzir o diâmetro D aumenta-se a perda de carga j .

A perda de carga j relaciona-se com a energia exigida para movimentar a água pela expressão,

$$\dot{W} = \frac{\dot{V} \cdot j}{\eta},$$

sendo η um fator que traduz o rendimento da conversão da energia elétrica na central de bombagem.

Se o preço da energia elétrica for p_E , a despesa anual—os custos de exploração—são determinados por,

$$A = \dot{W} \cdot p_E \cdot \Delta t$$

representando Δt o período de tempo anual.

Uma rede de distribuição de água possui horizonte temporal que pode exceder os 30 anos; as despesas neste horizonte atualizadas ao presente (com A constante) são obtidas a partir das expressões facultadas nesta secção,

$$D_v = A \cdot R.$$

No ano zero tem-se, portanto, a expressão

$$I_0 + A \cdot R, \quad (**)$$

onde I_0 e $A \cdot R$ possuem comportamentos contrários. I_0 aumenta com o diâmetro ao passo que $A \cdot R$ diminui com o aumento do diâmetro.

Como se compreende, por muito elevado que seja o investimento inicial, as despesas de exploração em 30 anos de serviço podem facilmente suplantar o investimento inicial. Importa, então, encontrar o equilíbrio financeiro entre diâmetros reduzidos—representando menores custos iniciais—e perdas de carga reduzidas (exigindo maiores diâmetros)—representando menores despesas de exploração.

Uma vez que j se relaciona com D pela expressão (*), pretende-se determinar o valor de j que minimiza a expressão (**).

Resolução:

Substituindo a relação linear entre I_0 e D e a expressão (*) na forma

$$D = \left(\frac{k\dot{V}^n}{j} \right)^{\frac{1}{m}}$$

em (**), obtém-se,

$$I = c_0 + c_1 \left(\frac{k\dot{V}^n}{j} \right)^{\frac{1}{m}} + \frac{\dot{V} \cdot j}{\eta} p_E \cdot \Delta t \cdot R.$$

O valor j que minimiza esta expressão é obtido da derivada de I em ordem a j igualada a zero.

$$\frac{dI}{dj} = -\frac{c_1}{m} \frac{1}{j} \left(\frac{k\dot{V}^n}{j} \right)^{\frac{1}{m}} + \frac{\dot{V}}{\eta} p_E \cdot \Delta t \cdot R = 0,$$

que tem por resultado,

[Exercício resolvido 4.6]

$$j = \left(\frac{1}{m} \frac{c_1}{p_E} \frac{\eta}{\Delta T \cdot R} \right)^{\frac{m}{m+1}} \cdot k^{\frac{1}{m+1}} \cdot \dot{V}^{\frac{n-m}{m}} .$$

Com base nesta expressão, atendendo às características dos materiais e equipamentos (aos valores das constantes k , η , etc.), é possível determinar o valor de j ótimo para uma aplicação específica e, mais importante; é possível deduzir relações entre despesas e os diferentes parâmetros tecnológicos da rede de distribuição de água.

[Exercício resolvido 4.6] —

5

Infraestrutura ecológica^[‡]

[‡] Capítulo redigido em co-autoria com Ângela Lacerda-Nobre e Fernando Pimentel.

Em Portugal, na contabilização da energia elétrica de origem renovável e da energia elétrica importada usa-se um rendimento de 100% (recordar a **Nota 1.3** e o **Exercício resolvido 2.1**). Ou seja, se Portugal importar 1 MWh de eletricidade produzida numa central nuclear francesa, tal equivale a 1 MWh de energia final. Se Portugal produzir 1 MWh de energia fotovoltaica, tal corresponde a 1 MWh de energia final.

Na realidade, a radiação solar, a energia nuclear consumidas para a produção e, o transporte da eletricidade, impõem rendimentos muito inferiores a 100%. A título de exemplo, se, em lugar de assumir este rendimento de conversão de 100% se admitisse que a eletricidade renovável substituíra combustíveis fósseis com um rendimento de conversão de aproximadamente¹⁹ 40%, conseguia-se evidenciar a quantidade de combustíveis fósseis poupados.

O modo como se contabiliza o uso da energia no balanço energético possui, portanto, uma dimensão sociopolítica e espelha o modo como a sociedade se relaciona com os recursos naturais. Na modalidade de contabilização usada em Portugal, o consumo de energia primária fóssil é equivalente à energia final renovável; porém, combustíveis fósseis, energia solar, energia nuclear, possuem características muito distintas. Com efeito, os combustíveis fósseis são excepcionais, na medida em que colocam ao alcance da generalidade dos cidadãos enormes quantidades de energia (química) com tecnologia convencional. Comparativamente, a energia solar fornece potências menores e o recurso a energia nuclear exige tecnologia complexa que não está ao alcance do cidadão comum. Simultaneamente e, ao contrário da energia solar ou nuclear, os combustíveis fósseis são um tipo de energia impossível de repor numa escala de tempo humana, tornando-os, portanto, finitos.

O conceito de exergia introduzido no Capítulo 3 fornece pistas para compreender a diferença entre usar combustíveis fósseis e radiação solar, por exemplo, para produzir água quente. Ao contrário do conceito de energia, que se conserva, a exergia (o potencial de trabalho) perde-se e, a perda é tanto maior quanto mais elevadas as diferenças de temperatura que fazem “mover” as trocas de calor. Combustíveis fósseis que libertam calor a elevadas temperaturas têm associados perdas de exergia também elevadas; muito maio-

¹⁹Viu-se no **Exercício resolvido 3.8** que esta percentagem é aquela das centrais termoeletricas portuguesas.

res do que as que ocorrem num painel solar térmico com trocas de calor a temperaturas próximas da ambiente.

Acresce, face à finitude dos combustíveis fósseis, a importância de associar às diferentes formas de energia o esforço requerido para as obter; esforço este que, naturalmente, tenderá a aumentar à medida que as reservas diminuam. Um conceito que integra, numa perspectiva de ciclo de vida, o ónus da extração de combustíveis fósseis é o Consumo Acumulado de Energia (CAE). Aplicado na análise energética de bens e serviços, este conceito soma a *energia primária* necessária para a produção (CAE_p), uso (CAE_u) e desativação (CAE_d) dos bens e serviços, considerando o ciclo de vida completo²⁰,

$$CAE = CAE_p + CAE_u + CAE_d . \quad (5.1)$$

Com esta metodologia, um determinado bem ou serviço pode representar uma redução do consumo de energia quando está a ser usado; porém, à luz do CAE, estas reduções durante o uso podem ser canceladas por incrementos de consumo na produção e/ ou desativação do bem ou serviço. Por exemplo, aquando da avaliação do impacto—medido por emissões de CO₂—de diferentes formas de produção de energia elétrica, numa análise que considere apenas o uso, centrais fotovoltaicas ou parques eólicos praticamente não possuem consumos associados. Contudo, como mostram os valores da Tabela 5.1, numa análise comparativa que considere o ciclo de vida, considerando emissões associadas à construção e desativação, conclui-se existir uma ordem de grandeza de diferença entre estas tecnologias.

Para além da produção eólica e fotovoltaica, a Tabela 5.1 inclui outros modos de produção de energia, sendo esclarecedora a diferença de duas ordens de grandeza de emissões de CO₂ em centrais a carvão.

Existem diferentes modos de cálculo do CAE; referem-se de seguida dois:

- Análise de Ciclo de Vida (ACV). Método que analisa os vários passos em que se desagregam os processos de produção, uso e desmantelamento e se atribui a cada passo um valor de energia consumida/ emissões de CO₂;
- Quadros de fluxos económicos: Método que usa quadros económicos relacionando consumos de energia nas indústrias produtoras, necessidades nas indústrias produtoras de bens e serviços, e a procura pelos bens e serviços.

5.1 Análise de ciclo de vida

Com este método faz-se uma análise das entradas e saídas de massa e energia em cada passo do ciclo de vida do bem ou serviço desde a sua produção até ao desmantelamento. Quando existe

Nota 5.1: Economia circular/ ecologia industrial

Economia circular/ ecologia industrial são conceitos que procuram reproduzir na economia e indústria aquilo que se observa na natureza, com a utilização em cadeia dos resíduos de um processo como matéria-prima do seguinte até fechar um círculo. Quando aplicados às trocas de calor, correspondem a selecionar a produção de energia a temperatura tão próxima quanto possível da temperatura a operamos. Caso a temperatura a que se troca calor seja distinta daquela de referência, T_0 , deve aproveitar-se o calor (ou a ausência deste) noutros processos, evitando o desperdício.

²⁰Na nomenclatura inglesa, *Life Cycle Assessment*, LCA. Ver https://en.wikipedia.org/wiki/Life-cycle_assessment

Modo de produção	Emissões
Parque eólico	10~20
Painéis fotovoltaicos	90~190
Barragem/ hidroeletricidade	10~40
Central nuclear	6~32
Central ciclo combinado	~50
Central termoele.gás nat.	430~700
Central termoele.carvão	700~1000
Central termoele.lenhite	1100~1200

Tabela 5.1: Emissões de CO₂ em g/kWh de energia elétrica para diferentes modo de produção. Valores contabilizando todo o ciclo de vida, incluindo emissões para construção, operação e manutenção dos sistemas. No modo de produção nuclear excluem-se as emissões devidas ao tratamento de resíduos [in Kümmel, 2011, p.141].

informação suficiente a aplicação desta metodologia é simplificada. Contudo, nem sempre é fácil decidir sobre a origem de uma dada matéria prima ou sobre as trocas de massa e de energia num passo do ciclo.

Na Figura 5.1 apresenta-se uma tabela (em língua inglesa) que facilita a compreensão do método ACV [Havér, 2001].

Basic need								
Product								
Environment-al Impact	Energy consumption	Waste generation	Air pollution	Water pollution	Soil contamination	Total		
Value of the stage	1 – Process or method with low energy consumption 2 – Average energy consumption 3 – Large consumption	1 – Little waste, no hazardous 2 – Average waste, no specially high volumes or risks 3 – High volumes, also hazardous waste	1 – No air pollution at this stage 2 – Some air pollution, but not considerably high 3 – Considerable air pollution	1 – No water pollution at the stage 2 – Some air pollution under control, (treated) 3 – The process often pollutes water, or high risk of that exists	1 – No potential to contaminate soil 2 – The process potentially pollutes the soil, but it is not likely 3 – Frequent occurrence of normal or accidental soil contamination	Sum up the values in the row		
Decide on the stages!	Extraction of resources							
	Transport, storage of resources							
	Production of raw materials							
	Transport, storage of raw materials							
	Manufacturing, assembly							
	Transport, storage of finished products							
	Marketing, distribution							
	Transport to the consumer, installation							
	Use, useful life							
	Waste transport							
	Waste disposal							
Total:								

Figura 5.1: Tabela para avaliação do impacte ambiental de bens e serviços com o método ACV.

A Figura 5.1 permite comparar soluções alternativas, associando um valor quantitativo ao impacte ambiental de bens ou serviços. Para tal há que atribuir classificações subjetivas num escala de 1 a 3 aos diferentes passos do ciclo de vida de um bem ou serviço.

Quando se pretendem comparações baseadas em grandezas físicas, o uso da ACV envolve o recurso a ferramentas informáticas e bases de dados com características de materiais²¹.

Existem trabalhos [e.g., Wall, 1977] onde se recupera o conceito de exergia—incluindo aquela perdida em reações químicas; tema que não foi abordado no Capítulo 3—para contabilizar a exergia perdida na extração, síntese metalúrgica dos materiais e decomposição dos resíduos até atingirem a neutralidade exergética com o ambiente. Um outro conceito corrente na análise de sistemas ecológicos é aquele de *emergia*, onde se usa a radiação solar incidente

²¹Ver, por exemplo, <https://www.openlca.org/lca-data/>

equivalente como unidade de comparação de conteúdo energético (ver <https://en.wikipedia.org/wiki/Emergy>).

5.2 Quadros de fluxos económicos

O método dos quadros de fluxos económicos—conhecido na nomenclatura inglesa como método da matriz input-output (de Leontief)—permite aprofundar o conhecimento sobre a procura da energia, integrando informação dos fluxos de energia que atravessam os diversos setores produtivos para se chegar aos produtos finais.

Na apresentação deste método começamos por nos basear num exemplo de Griffin [1976] para uma economia com apenas duas indústrias: a automóvel e a de produção de energia.

Consideremos os dados hipotéticos apresentados na Tabela 5.2.

[EUR]	Indústria Auto., $j = 1$	Indústria Energ., $j = 2$	Procura, f	Total vendas, x
Indústria	100	200	700	1000
Auto., $i = 1$	$[z_{11}]$	$[z_{12}]$	$[f_1]$	$[x_1]$
Indústria	250	60	290	600
Energ., $i = 2$	$[z_{21}]$	$[z_{22}]$	$[f_2]$	$[x_2]$
Custos pessoal, c	600	200	–	–
	$[c_1]$	$[c_2]$		
Lucros, c'	50	40	–	–
	$[c'_1]$	$[c'_2]$		
Total fatores de custo, x	1000	600	990	1600
	$[x_1]$	$[x_2]$		

Na Tabela 5.2, analisando a linha $i = 1$, constata-se que o total de vendas de automóveis num dado ano, t , foi 1000EUR, e resultou de 100EUR de vendas à própria indústria (carros de serviço), 200EUR de vendas à indústria de energia (para transporte de energia, ou manutenção), representando os 700EUR sobrantes a procura pelo mercado (vendas ao público).

Repare-se que, com base na notação usada na Tabela 5.2 se tem,

$$x_i = \sum_{j=1}^M z_{ij} + f_i. \quad (5.2)$$

Analisando a coluna $j = 1$ da Tabela 5.2 verifica-se que os custos em que a indústria automóvel incorre para vender 1000EUR de carros se reparte do seguinte modo: 100EUR na produção dos carros, 250EUR em energia, 600EUR em custos com pessoal e 50EUR de lucros (custo do capital investido).

Tabela 5.2: Quadro de fluxos económicos para duas indústrias (valores em EUR). Baseado em Griffin [1976, p.I.1].

Definindo os coeficientes “tecnológicos” por,

$$a_{ij} = z_{ij} / x_j \quad (5.3)$$

e, matriz “tecnológica” (ou de input-output) como, $A = [a_{ij}]$, representando o custo (o valor incorporado) de cada uma das duas indústrias para 1EUR de vendas (de produção) de automóvel e 1EUR de vendas (de produção) de energia; usando esta definição de matriz tecnológica, a informação contida na Tabela 5.2 pode ser representada na forma matricial por,

$$Ax + f = x, \quad (5.4)$$

onde x e f são os vetores coluna obtidos a partir de x_i e f_i , respetivamente.

Resolvendo Equação (5.4) em ordem a x obtém-se,

$$x = (I - A)^{-1} f, \quad (5.5)$$

onde I é a matriz identidade e os coeficientes da matriz

$$L = (I - A)^{-1} \quad (5.6)$$

definem os multiplicadores de Leontief. A matriz L toma a designação de inversa de Leontief e, porque $\frac{\partial x}{\partial f} = L$, exprime o efeito de variações na procura no total dos fatores de custo.

No caso em análise, para os valores da Tabela 5.2 relativos ao ano t , obtém-se,

$$\begin{aligned} L = (I - A)^{-1} &= \left[\begin{array}{cc} 1 - \frac{100}{1000} & 0 - \frac{200}{600} \\ 0 - \frac{250}{1000} & 1 - \frac{60}{600} \end{array} \right]^{-1} \\ &= \left[\begin{array}{cc} 0,900 & -0,333 \\ -0,250 & 0,900 \end{array} \right]^{-1} = \left[\begin{array}{cc} 1,24 & 0,46 \\ 0,34 & 1,24 \end{array} \right]. \end{aligned} \quad (5.7)$$

Este resultado mostra que um aumento $\Delta f_1 = 100$ EUR na procura de automóveis (admite-se $\Delta f_2 = 0$) tem como efeito gastar $\Delta x_1 = 124$ EUR na indústria automóvel e $\Delta x_2 = 34$ EUR na indústria de energia. Note-se que os 24EUR e os 34EUR adicionais exigidos na indústria automóvel e de energia, respetivamente, para

dar resposta ao aumento da procura não estão diretamente relacionados com os automóveis produzidos. Espelham, antes, efeitos indiretos.

Pensando em termos energéticos, repare-se que custos/ consumos energéticos indiretos podem ser reduzidos se a evolução tecnológica resultar numa maior eficiência dos processos. Porém, porque os custos/ consumos de energia totais x_j dependem da procura, aumentos de procura Δf_i podem cancelar reduções nos consumos de energia por otimização “tecnológica”. O aumento da procura implicará, no cômputo global, um aumento do consumo total²², Δx_j .

Usemos um exercício para clarificar este aspeto.

²²No Capítulo 7, a propósito do paradoxo de Jevons, aproveitar-se-á esta conclusão.

— **[Exercício resolvido 5.1]** —

Tomando por base os dados da Tabela 5.2 para as indústrias automóvel e de produção de energia, admita conseguir no ano $(t + 1)$, por otimização dos processos, uma redução nos coeficientes da matriz tecnológica a_{ij} de 10%; mas, em simultâneo, um aumento da procura de 10%.

- Neste caso, qual será o total dos fatores de custo x (igual ao total de vendas) nas indústrias automóvel e de produção de energia?
- Qual seria o total dos fatores de custo se a otimização dos processos tecnológicos fosse de 20% (mantendo-se a procura nos 10%)?

Resolução:

- O aumento da procura em 10% é traduzido pelo vetor $f = [770 \ 319]^T$ (representando o índice superior T a operação de transposição).

A redução em 10% dos coeficientes a_{ij} tem como resultado,

$$\begin{aligned} L &= \begin{bmatrix} 1 - 0,9 \cdot \frac{100}{1000} & 0 - 0,9 \cdot \frac{200}{600} \\ 0 - 0,9 \cdot \frac{250}{1000} & 1 - 0,9 \cdot \frac{60}{600} \end{bmatrix}^{-1} \\ &= \begin{bmatrix} 0,910 & -0,300 \\ -0,225 & 0,910 \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} 1,20 & 0,39 \\ 0,30 & 1,20 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

O total dos fatores de custo por indústria resulta,

$$\begin{aligned} x = Lf &\Leftrightarrow \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,20 & 0,39 \\ 0,30 & 1,20 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 770 \\ 319 \end{bmatrix} \Leftrightarrow \\ \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1047 \\ 609 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

Ou seja, o aumento da procura sobrepõe-se à redução dos custos por otimização dos processos resultando, face ao ano t , um

[Exercício resolvido 5.1]

[Exercício resolvido 5.1]

aumento de 56EUR do total dos fatores de custo. Desta quantia, 47EUR corresponde ao aumento na indústria automóvel e 9EUR ao aumento na indústria de produção de energia. Observa-se, portanto, um aumento das necessidades de produção e de consumo de energia.

b) Com uma redução em 20% dos coeficientes a_{ij} tem,

$$\begin{aligned} L &= \begin{bmatrix} 1 - 0,8 \cdot \frac{100}{1000} & 0 - 0,8 \cdot \frac{200}{600} \\ 0 - 0,8 \cdot \frac{250}{1000} & 1 - 0,8 \cdot \frac{60}{600} \end{bmatrix}^{-1} \\ &= \begin{bmatrix} 0,920 & -0,266 \\ -0,200 & 0,920 \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} 1,16 & 0,34 \\ 0,25 & 1,16 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

O total dos fatores de custo por indústria resulta,

$$\begin{aligned} x = Lf &\Leftrightarrow \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,16 & 0,34 \\ 0,25 & 1,16 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 770 \\ 319 \end{bmatrix} \Leftrightarrow \\ \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1000 \\ 564 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

Este resultado permite concluir que, perante um aumento da procura de 10%, são precisas reduções nos custos por otimização dos processos superiores a 10% para se ter uma redução efetiva do total dos fatores de custo. A redução—36EUR—ocorre na indústria de produção de energia, e corresponderia a uma diminuição efetiva das necessidades de produção e de consumo de energia.

[Exercício resolvido 5.1]

Na análise até agora apresentada usou-se sempre a unidade monetária EUR. Caso o custo da energia seja igual em todas as indústrias e na venda ao público podem-se multiplicar custos, procura e vendas de energia por um fator de conversão em kWh, por exemplo, mantendo-se válida a discussão anterior.

Porém, os custos da energia variam significativamente entre indústrias e na venda ao público. Assim, para analisar os fluxos de energia em quadros de fluxos económicos, a par da Equação (5.2) considera-se a relação,

$$g_i = \sum_{j=1}^M e_{ij} + q_i, \quad (5.8)$$

com e_{ij} os fluxos de energia da(s) indústria(s) produtora(s) para

a(s) consumidora(s) de energia, q_i o vetor com os fluxos de energia que satisfazem a procura de energia final e g_i o consumo total de energia.

Por analogia com a análise apresentada anteriormente, admite-se a existência de uma matriz α que verifica uma relação do tipo $g = \alpha f$. Conforme Miller and Blair [2009], esta matriz é obtida de,

$$\alpha \hat{x} = \alpha Z + G, \quad (5.9)$$

onde:

- α é uma matriz $m \times n$ com m o número de setores energéticos requeridos para produzir 1EUR nos n setores industriais considerados.
- \hat{x} é a matriz diagonal $n \times n$ com elementos da diagonal iguais²³ a x .
- Z é a matriz $n \times n$ com elementos z_{ij} do quadro económico de entradas e saídas.
- G é a matriz $m \times n$ com todos os elementos nulos excepto aqueles da diagonal correspondentes ao consumo total de energia nos setores energéticos²⁴.

²³ $\hat{x} = \text{diag}(x) = I \odot (x 1^T)$ com \odot o produto Hadamard, 1^T o vetor linha unitário e I a matriz diagonal unitária. Em alternativa, sendo e_i o vetor base i em \mathbb{R}^n , $\hat{x} = \sum_{i=1}^n e_i^T x e_i^T$.

²⁴ $G = \sum_{k=1}^m e_k^T g e_k e_k^T$, com e_k o vetor base k em \mathbb{R}^m , o espaço dos setores energéticos considerados.

Porque com a notação acima se tem

$$Z = A \hat{x}, \quad (5.10)$$

com A a matriz tecnológica; da Equação (5.9) obtém-se,

$$\begin{aligned} \alpha \hat{x} &= \alpha Z + G \Leftrightarrow \alpha \hat{x} - \alpha (A \hat{x}) = G \\ \alpha (I \hat{x} - A \hat{x}) &= G \\ \alpha (I - A) \hat{x} &= G \\ \alpha (I - A) &= G \hat{x}^{-1} \\ \alpha &= G \hat{x}^{-1} (I - A)^{-1} \\ \alpha &= G \hat{x}^{-1} L, \end{aligned} \quad (5.11)$$

com L a matriz inversa de Leontief.

Na aplicação da Equação (5.11), existindo duplicação de informação para os setores industriais energéticos com informação em EUR e uma unidade energética (por exemplo, kWh), definem-se matrizes (com unidades) híbridas—assinaladas com (*)—do seguinte modo:

- $Z^* = [z_{ij}^*] = \begin{cases} z_{ij}, & \text{quando } i \text{ é relativo a um setor não-energético} \\ e_{kj}, & \text{sendo } k \text{ um setor energético} \end{cases}$

com dimensão $n \times n$.

$$\bullet \mathbf{f}^* = [f_i^*] = \begin{cases} f_i, & \text{quando } i \text{ é relativo a um setor não-energético} \\ q_k, & \text{sendo } k \text{ um setor energético} \end{cases}$$

com dimensão $n \times 1$.

$$\bullet \mathbf{x}^* = [x_i^*] = \begin{cases} x_i, & \text{quando } i \text{ é relativo a um setor não-energético} \\ g_k, & \text{sendo } k \text{ um setor energético} \end{cases}$$

com dimensão $n \times 1$.

$$\bullet \mathbf{g}^* = [g_i^*] = \begin{cases} 0, & \text{quando } i \text{ é relativo a um setor não-energético} \\ g_k, & \text{sendo } k \text{ um setor energético} \end{cases}$$

com dimensão $n \times 1$.

Para compreender a integração entre as expressões (5.8) e (5.2) para setores energéticos e setores industriais não-energéticos, considere-se um exercício.

[Exercício resolvido 5.2]

Complementa-se os dados da Tabela 5.2 para as indústrias automível e de produção de energia com a tabela abaixo que espelha as transações em unidades de energia (kWh) na indústria de energia.

	Ind. Auto.	Ind. Energ.	Procura	Total
[kWh]				
Ind.Energ.	60	80	100	240

- Determine a matriz α das necessidades energéticas totais.
- Repare que o termo $G\hat{x}^{-1}$ da Equação (5.11) permite identificar/isolar a(s) indústria(s) energética(s) das restantes na matriz inversa de Leontief. Usando esta propriedade, é possível isolar, também, as necessidades energéticas “tecnológicas”, determinadas a partir da matriz δ com expressão,

$$\delta = G(\hat{x}^*)^{-1}A^*,$$

definindo A^* a matriz tecnológica híbrida.

Determine a matriz δ das necessidades energéticas “tecnológicas” ou, inter-indústrias.

Resolução:

- Neste exercício $m = 1$ e $n = 2$. A dimensão das matrizes α e G é (1×2) ; a dimensão das matrizes Z e \hat{x} é (2×2) .

Começa-se por determinar, da Equação (5.10)

[Exercício resolvido 5.2]

[Exercício resolvido 5.2]

$$\begin{aligned}
 A^* &= Z^*(\hat{x}^*)^{-1} \\
 &= \begin{bmatrix} 100 & 200 \\ 60 & 80 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1000 & 0 \\ 0 & 240 \end{bmatrix}^{-1} \\
 &= \begin{bmatrix} 0,100 & 0,833 \\ 0,060 & 0,333 \end{bmatrix}.
 \end{aligned}$$

Conhecido A^* determina-se L^* ,

$$\begin{aligned}
 L^* &= (I - A^*)^{-1} \\
 &= \begin{bmatrix} 0,900 & -0,833 \\ -0,060 & 0,667 \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} 1,212 & 1,515 \\ 0,109 & 1,636 \end{bmatrix}.
 \end{aligned}$$

Com G determinado de,

$$G = (g^*)^T = [0 \ 240]$$

resulta,

$$\begin{aligned}
 \alpha &= G(\hat{x}^*)^{-1}L^* \\
 &= \begin{bmatrix} 0 & 240 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{1000} & 0 \\ 0 & \frac{1}{240} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1,212 & 1,515 \\ 0,109 & 1,636 \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} 0,109 & 1,636 \end{bmatrix}.
 \end{aligned}$$

Repare-se que, como esperado,

$$\begin{aligned}
 g &= \alpha f^* \\
 &= \begin{bmatrix} 0,109 & 1,636 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 700 \\ 100 \end{bmatrix} = 240 \text{ kWh.}
 \end{aligned}$$

A matriz α mostra que para produzir 1EUR no setor automóvel é requerido do setor energético 0,109 kWh e que para o setor energético produzir 1 kWh requer o consumo total de 1,636 kWh.

Na alínea seguinte identificam-se os custos associados à matriz tecnológica, às relações inter-indústria, sem considerar a procura pelo mercado.

[Exercício resolvido 5.2]

[Exercício resolvido 5.2]

b) Usando, como referido, a matriz tecnológica híbrida A^* em lugar de L^* na Equação (5.11), resulta,

$$\begin{aligned}\delta &= G(\hat{x}^*)^{-1}A^* \\ &= \begin{bmatrix} 0 & 240 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{1000} & 0 \\ 0 & \frac{1}{240} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0,100 & 0,833 \\ 0,060 & 0,333 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 0,060 & 0,333 \end{bmatrix} .\end{aligned}$$

Da expressão,

$$\begin{aligned}g_{\text{tec}} &= \delta f^* \\ &= \begin{bmatrix} 0,060 & 0,333 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 700 \\ 100 \end{bmatrix} = 75 \text{ kWh} ,\end{aligned}$$

concluindo-se que as necessidades de energia associadas à matriz tecnológica—às relações inter-indústrias—são 75kWh.

— **[Exercício resolvido 5.2]** —

Na próxima subsecção apresenta-se um exercício que desagrega o setor energético identificando: energia primária (crude) e energias finais obtidas desta (petróleo refinado e, eletricidade).

5.3 Exercícios resolvidos e propostos

[Exercício resolvido 5.3]

[Miller and Blair, 2009, p.408]

Tabela de fluxos económicos inter-indústria (em milhões de euros).

[10^{-6} EUR]	Auto.	Crude	Petrol.	Elet.	Procura	Total
Auto.	0	0	0	0	20	20
Crude	0	0	50	50	0	100
Petrol.	25	25	25	0	125	200
Elet.	25	25	12,5	12,5	125	200

Tabela de fluxos de energia (em milhares de milhão de MWh) nas indústrias de produção de energia.

[10^{-9} MWh]	Auto.	Crude	Petrol.	Elet.	Procura	Total
Crude	0	0	20	20	0	40
Petrol.	1	1	3	0	15	20
Elet.	2,5	2,5	1,25	1,25	12,5	20

Os quadros de fluxos económicos e de fluxos de energia identificam 4 indústrias ($n = 4$); a automóvel, não-energética, e três indústrias energéticas ($m = 3$): a de extração de petróleo—que designamos como *Crude*—, a de refinação de petróleo (*Petrol.*) e a de produção de eletricidade (*Elet.*).

- Pretende-se determinar a matriz α que relaciona as necessidades de energia total com o valor da procura nas diferentes indústrias.
- Qual a variação das necessidades de energia total se a procura na indústria automóvel duplicar?

Resolução:

Antes de responder às questões, começa-se por destacar nos quadros apresentados as diferenças entre contabilizar fluxos económicos, expressos em mega-EUR, M(EUR), e fluxos de energia, expressos em giga-MWh, G(MWh). A estrutura de custos da indústria automóvel mostra que adquire 25 M(EUR) às indústrias de petróleo e de produção de eletricidade. Porém, em unidades físicas, esses 25 M(EUR) correspondem a diferentes quantidades de energia: 1 G(MWh) de petróleo e 2,5 G(MWh) de eletricidade. Daqui conclui-se ser a eletricidade adquirida a menor preço, 0,01 EUR/MWh contra 0,025 EUR/MWh do petróleo.

Analisando os custos da indústria de petróleo, observa-se a aquisição de 20 G(MWh) de crude por 50 M(EUR), ao preço de 0,0025 EUR/MWh; 3G(MWh) de petróleo por 25 M(EUR), ao preço de 0,012 EUR/MWh; e, 1,25 G(MW) de eletricidade por 12,5 M(EUR), ao preço de 0,01 EUR/MWh. Desta análise fica clara a diferença nos preços da energia.

Analisando o peso da indústria automóvel nas vendas de energia final—petróleo e eletricidade—, expressas em M(EUR), chega-se a $12,5[(25+25)/(200+200)]\%$. A mesma análise em unidades de energia mostra que as vendas à indústria automóvel representam apenas $8,75[(1+2,5)/(20+20)]\%$ do total de G(MWh) vendidos pelas indústrias de refinação de petróleo e de produção de eletricidade.

Análises assentes em quadros de fluxos económicos e de fluxos de energia realçam, portanto, as diferenças—os desajustes—entre o valor de mercado e o conteúdo energético de diferentes formas de energia. No Capítulo 7 aprofunda-se a importância de corrigir os desajustes existentes.

- As dimensões das matrizes usadas nas expressões (5.10) e (5.11) são: α e G , (3×4); Z e \hat{x} , (4×4). Tratar-se-ão de matrizes híbridas com unidades monetárias para a indústria automóvel (a única não-

[Exercício resolvido 5.3]

[Exercício resolvido 5.3]

energética) e unidades físicas de energia nas restantes.

Começa-se por determinar, de Equação (5.10)

$$\begin{aligned}
 A^* &= Z^*(\hat{x}^*)^{-1} \\
 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 20 & 20 \\ 1 & 1 & 3 & 0 \\ 2,5 & 2,5 & 1,25 & 1,25 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 20 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 40 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 20 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 20 \end{bmatrix}^{-1} \\
 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0,050 & 0,025 & 0,150 & 0 \\ 0,125 & 0,0625 & 0,0625 & 0,0625 \end{bmatrix}.
 \end{aligned}$$

Conhecido A^* determina-se L^* ,

$$\begin{aligned}
 L^* &= (I - A^*)^{-1} \\
 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & -1 \\ -0,05 & -0,025 & 0,85 & 0 \\ -0,125 & -0,0625 & -0,0625 & 0,9375 \end{bmatrix}^{-1} \\
 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0,2174 & 1,1087 & 1,3913 & 1,1826 \\ 0,0652 & 0,0326 & 1,2174 & 0,0348 \\ 0,1522 & 0,0761 & 0,1739 & 1,1478 \end{bmatrix}.
 \end{aligned}$$

Com G determinado pela expressão,

$$G = \text{diag}(g^*) = \begin{bmatrix} 0 & 40 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 20 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 20 \end{bmatrix},$$

resulta,

[Exercício resolvido 5.3]

[Exercício resolvido 5.3]

$$\begin{aligned}
\alpha &= G(\hat{x}^*)^{-1}L^* \\
&= \begin{bmatrix} 0 & 40 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 20 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 20 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{20} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{40} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{20} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{20} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0,2174 & 1,1087 & 1,3913 & 1,1826 \\ 0,0652 & 0,0326 & 1,2174 & 0,0348 \\ 0,1522 & 0,0761 & 0,1739 & 1,1478 \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0,2174 & 1,1087 & 1,3913 & 1,1826 \\ 0,0652 & 0,0326 & 1,2174 & 0,0348 \\ 0,1522 & 0,0761 & 0,1739 & 1,1478 \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} 0,2174 & 1,1087 & 1,3913 & 1,1826 \\ 0,0652 & 0,0326 & 1,2174 & 0,0348 \\ 0,1522 & 0,0761 & 0,1739 & 1,1478 \end{bmatrix}.
\end{aligned}$$

Repare-se que, adicionando as linhas $i = 2$ e $i = 3$ da matriz α representando fluxos de energia de setores que produzem energia final, se obtém a linha $i = 1$, relacionada com fluxos de energia primária (extrativa) que estão na base da refinação de petróleo e produção de termoeletricidade.

b) A variação dos consumos e energia total, Δg , pela duplicação da procura no setor automóvel, $\Delta f_1^* = 20$ (mantendo-se a procura nas restantes indústrias), é determinada por,

$$\begin{aligned}
\Delta g &= \alpha \Delta f^* \\
&= \begin{bmatrix} 0,2174 & 1,1087 & 1,3913 & 1,1826 \\ 0,0652 & 0,0326 & 1,2174 & 0,0348 \\ 0,1522 & 0,0761 & 0,1739 & 1,1478 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 20 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4,348 \\ 1,304 \\ 3,043 \end{bmatrix}.
\end{aligned}$$

Em termos de *energia primária*, o incremento no consumo pela duplicação das vendas automóveis é de $4,348 \times 10^9$ MWh, representando $0,1087 (= 4,348/40) = 10,87\%$ do consumo total dessa energia. O grosso dessa energia, $0,70 (= 3,043/4,348) = 70\%$, é usada pela indústria automóvel sob a forma de eletricidade.

— **[Exercício resolvido 5.3]** —

6

Auditoria Energética

A auditoria energética exige conhecimento e uso de ferramentas relacionadas com os domínios tecnológico, económico, ambiental; o conhecimento da infraestrutura legislativa, permitindo implementar políticas de gestão da energia nas empresas e alinhar esta política com os objetivos mais vastos dos estados.

No Capítulo 2 percebeu-se que os objetivos da auditoria energética estão normalmente balizados por legislação em eficiência energética. Este capítulo coloca o enfoque na indústria e começa por detalhar estas balizas para o caso português. De seguida, dá-se destaque a algumas competências fundamentais quando se elabora um relatório de auditoria energética. Opta-se por enfatizar a capacidade de interpretar, como um todo, o sistema energético em estudo, de comunicar o seu desempenho e formas de o otimizar energeticamente, deixando-se de fora—para outros textos e, preferencialmente, para o contacto direto em estágios—as competências de uso de equipamento de monitorização e análises mais detalhada de redes de ar-comprimido, de produção de vapor, elétrica, etc.

6.1 Auditoria energéticas e o SGCIE

Do mesmo modo que o balanço energético—ver **Nota 1.3**—é indispensável para o desenvolvimento de políticas energéticas dos estados, a auditoria energética está na base da política e gestão da energia nas empresas.

Em Portugal a auditoria energética está regulada no SGCIE. Estão obrigadas ao cumprimento deste regulamento e à realização de auditorias energéticas todas as empresas ou instalações cujo consumo de energia no ano civil imediatamente anterior tenha excedido 500 tep—ver **Nota 6.1**.

Entre as empresas/ instalações ao abrigo do SGCIE distinguem-se dois grupos. Aquelas com consumos superiores a 1000 tep/ano e as que possuem consumos entre 500 e 1000 tep/ano. As instalações com consumo superior a 1000 tep/ano estão obrigadas à realização de auditorias energéticas mais frequentes, de 6 em 6 anos. Também se definem para estas empresas metas de redução do consumo de energia mais ambiciosas; designadamente, 6% de redução de intensidade energética (e a manutenção da intensidade carbónica).

Nota 6.1: Exceções na aplicação do SGCIE

Existem exceções à regra de ser instalação consumidora intensiva de energia para consumos superiores a 500 tep/ano. Por exemplo, instalações de cogeração (juridicamente autónomas dos respetivos consumidores de energia), empresas de transporte e empresas com frotas próprias consumidoras intensivas de energia, instalações consumidoras intensivas sujeitas ao PNALE, edifícios sujeitos ao Sistema de Certificação Energética (SCE), concretamente, ao regulamento RECS aplicável a edifícios de escritórios.

O SGCIE prevê, ainda, que empresas com consumos inferiores a 500 tep/ano possam aderir voluntariamente, celebrando também contratos de racionalização de consumo.

Já para as empresas com consumos entre 500 e 1000 tep/ano, as reduções impostas são de apenas 4% de 8 em 8 anos, período de tempo entre a realização de auditorias.

Relativamente à informação técnica trocada entre a instalação CIE e a ADENE/ DGE, consideram-se os relatórios de auditoria energética, os planos de racionalização de energia e os relatórios de execução e progresso. Quer o plano de racionalização quer os relatórios de execução e progresso derivam da auditoria energética.

A auditoria energética deve ser realizada por uma entidade independente e consiste em realizar um ponto da situação da empresa/ instalação no que diz respeito ao consumo de energia; atendendo não apenas à contabilidade energética, mas relacionando-a com os processos²⁵, sua eficiência e impacte ambiental.

Em concreto, no Despacho n. 17449/2008, de 27 de junho, a auditoria deve:

- i. quantificar consumos de energia.
- ii. efetuar uma inspeção visual dos equipamentos/ sistemas consumidores de energia, complementada pelas medições necessárias.
- iii. efetuar um levantamento e caracterização detalhados dos principais equipamentos consumidores de energia.
- iv. verificar o estado das instalações de transporte e distribuição de energia.
- v. esclarecer como é transformada a energia e quais os seus custos.
- vi. obter diagramas de carga elétricos dos sistemas considerados grandes consumidores de eletricidade.
- vii. determinar a eficiência energética de geradores de energia térmica.

Relativamente a estes pontos, para além da contabilidade energética (i), inspeção e cadastre de equipamentos (ii e iii), a menção às instalações de transporte e distribuição de energia (iv) refere-se a redes elétricas, de vapor, de ar comprimido, de frio (água glicolada, por exemplo). Estas redes têm na sua origem equipamentos produtores de energia (geradores de vapor, compressores) ou transformadores que, a par de equipamentos grandes consumidores no processo produtivo devem ser caracterizados (v a vii) com balanços de massa e de energia por forma a avaliar a sua eficiência.

A caracterização detalhada dos principais equipamentos consumidores implica a conceção de fluxogramas de processo e a monitorização de entradas e saídas de massa e energia em pontos fulcrais do processo. A monitorização é enfatizada para os casos da rede elétrica—especificando-se a obtenção de diagramas de carga—e, para geradores de energia térmica, vulgo, caldeiras.

Uma vez concluída a auditoria energética e, redigido o relatório de auditoria fundamentando, sob as perspetivas técnica e financeira, a adoção de medidas de utilização racionalização de energia

²⁵O consumo energético na empresa deriva, em primeira instância, do processo produtivo que transforma matérias primas em produtos finais; porém, para isso são essenciais serviços, como a iluminação, produção de calor, ar comprimido, refrigeração, etc., sem os quais o processo produtivo não pode passar. Num período inicial é comum a auditoria energética incidir especialmente sobre estes serviços. À medida que estes são otimizados, evolui-se para a otimização do processo produtivo, exigindo-se para tal um conhecimento das idiosincrasias dos sistemas energéticos da indústria que se audita.

(URE), cabe à gestão da empresa CIE decidir entre as medidas URE propostas, quais as adotar.

O plano de racionalização a n anos (6 ou 8 anos, consoante o consumo anual de energia) reflete a escolha da gestão da empresa CIE, especificando a calendarização de implementação das medidas URE e metas de redução de consumo a atingir. Este plano é submetido para aprovação pela DGEG e a empresa compromete-se a realizar e submeter (em formato eletrónico, *online*) relatórios de execução e progresso das medidas de racionalização dos consumos de energia com que se comprometeu. Findo o período de vigência do plano de racionalização, realiza-se nova auditoria reiniciando-se o processo²⁶.

A Figura 6.1 esquematiza os passos p a que ficam obrigadas a cada n anos empresas CIE portuguesas.

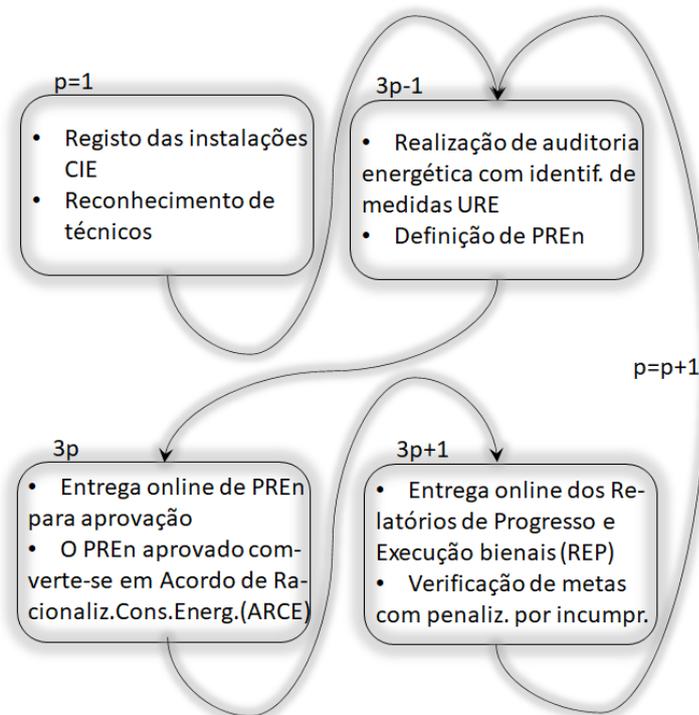


Figura 6.1: Passos p na aplicação do SGCIE.

Um índice de relatório de auditoria energética que pode ser usado como ponto de partida aquando da implementação do SGCIE é sugerido abaixo.

²⁶Repare-se como no SGCIE se preconiza a metodologia de melhoria contínua *plan-do-check-act* especificada, também, nas normas ISO 9001, 14001 e 50001, esta última, relativa à gestão da energia.

SUGESTÃO DE ÍNDICE DE RELATÓRIO DE AUDITORIA ENERGÉTICA

1. Introdução
2. Informação básica
 - 2.1. Ficha de identificação
 - 2.2. Fluxograma global de processo
 - 2.3. Matérias primas
 - 2.4. Produtos
 - 2.5. Resíduos
 - 2.6. Setores/ processos
 - 2.7. Instalações
 - 2.8. Frota de transporte
3. Contabilidade energética
 - 3.1. Consumos energéticos mensais por forma de energia
 - 3.2. Consumos energéticos anuais por forma de energia
 - 3.3. Custos energéticos anuais por forma de energia
 - 3.4. Emissões de CO₂ anuais por forma de energia
 - 3.5. Consumo específico/ intensidade energética global da instalação
 - 3.6. Intensidade carbónica global da instalação
 - 3.7. Consumo global da instalação sobre VAB
 - 3.8. Desagregação de consumos de energia por centros de custo
4. Gestão da energia
 - 4.1. Informação básica
 - 4.2. Atividades realizadas
 - 4.3. Problemas identificados
5. Análise de redes de distribuição de energia
 - 5.1. Eletricidade
 - 5.2. Vapor
 - 5.3. Ar comprimido
 - 5.4. Outros
6. Análise de principais consumidores e transformadores de energia
 - 6.1. Gerador de vapor
 - 6.2. Transformador
 - 6.3. Outros
7. Potenciais economias de energia
8. Medidas de URE
 - 8.1. Análise técnica
 - 8.2. Análise de investimento
 - 8.3. Medidas URE propostas (com calendarização)
9. Conclusões

Anexo: Especificações técnicas e propostas de fornecimento de equipamentos e serviços usadas para fundamentar análise técnico-financeira de investimentos em medidas de URE

6.2 Análise de processos com diagramas funcionais

Na secção anterior referiu-se a necessidade de realizar balanços de energia e de massa a processos produtivos e equipamentos grandes consumidores de energia. Estes balanços começam pela identificação de entradas e saídas de massa e de energia do sistema (do equipamento, de um volume de controlo²⁷) permitindo, com base nas técnicas discutidas no Capítulo 3, avaliar a eficiência energética/ exergética.

Para ajudar a identificar fluxos de massa e energia que entram e saem de um sistema é útil introduzir o conceito de processo unitário, ou caixa negra (*black box*, na nomenclatura inglesa, Glanville, 2012).

É este conceito de caixa negra que está na base da representação funcional, sendo a função articulada numa frase, numa estrutura verbo-nome. Caso se trate de um processo complexo com vários subprocessos, a definição da função começa com a identificação do fluxo principal, seguindo-se da identificação de fluxos acessórios e respetivas subfunções.

A melhor forma de apresentar um diagrama funcional é com base num exemplo. Consideremos a representação do funcionamento de um secador de cabelo—ver Figura 6.2.

A frase que identifica a função do secador de cabelo é “acelerar e aquecer o ar”, com os verbos *acelerar* e *aquecer* e o nome comum *ar*. Esta frase/ função é colocada numa caixa (negra, pois não nos interessamos em saber como o ar é aquecido ou acelerado) que define o sistema em análise.

Passando agora à análise de fluxos de entrada e de saída, como representado na Figura 6.3 tem-se, naturalmente, a massa de ar que entra e que sair, a uma velocidade e temperatura superior à ambiente. Ora, o aumento de temperatura resultou de um processo de aquecimento; a aceleração do ar foi acompanhada de um aumento da energia cinética. Aquecimento e aceleração resultam da transferência de calor, Q , e de energia mecânica, E_c . Mas estas formas de energia provêm, por seu turno, de outra fonte. Com efeito, o secador de cabelo não funciona sem que lhe forneçam energia elétrica, E_e . Existe portanto uma entrada de energia elétrica, que se transforma em calor (numa resistência) e em energia cinética (pela rotação do ventilador).

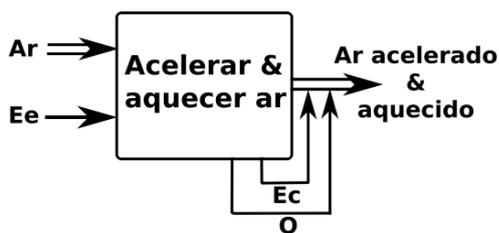
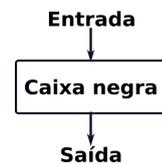


Figura 6.3: Diagrama funcional de secador de cabelo.

²⁷Sistema será aquilo que iremos estudar, a matéria, o equipamento, sobre o qual recairá a nossa atenção.

Nota 6.2: Caixas negra, cinzenta e branca

Aplica-se o conceito de caixa negra quando pretendemos estudar um sistema, qualquer que ele seja, físico ou de outro tipo, não nos importando com os detalhes dos processos que ocorrem; apenas as trocas, os fluxos de entrada e saída do sistema são importantes.



Caixas cinzentas e caixas brancas são aquelas onde temos conhecimento parcial e total, respetivamente, dos processos em curso.



Figura 6.2: Secador de cabelo.

Nota 6.3: Tipos de setas em diagramas funcionais

Em diagramas funcionais usam-se setas duplas (\Rightarrow) para representar fluxos de massa, setas simples (\rightarrow) para representar fluxos de energia e setas simples tracejadas ($-\rightarrow$) para representar sinais de controlo.

Repare-se que os fluxos de massa (ar) e de energia (elétrica, térmica e cinética) estão representados na Figura 6.3 com setas. Seta dupla para a massa e seta simples para a energia. A transformação de energia elétrica em térmica e cinética também se encontra representada.

Neste exemplo incluem-se apenas trocas de massa e de energia através da fronteira do sistema. Em muitos sistemas é possível distinguir entre a energia indispensável ao processo—por exemplo, para aquecimento ou para movimentar a massa—e aquela responsável pelo controlo do processo (troca de informação). Aquando da inclusão de sinais de controlo estes estão sempre associados a fluxos de massa ou de energia que entram ou saem do sistema, sendo representados por setas simples tracejadas.

Vejam os outros exemplos. Na Figura 6.4 representa-se uma máquina de café. A função realizada no sistema é definida através da frase “fazer café”, com *fazer* o verbo e *café* o nome comum. O diagrama funcional é apresentado na Figura 6.5 e considera mais de um fluxo de massa.



Figura 6.4: Fotografia de máquina de café.

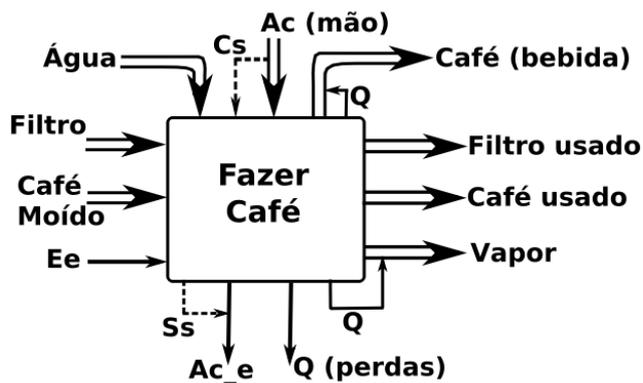


Figura 6.5: Diagrama funcional da máquina de café.

Entram no sistema representado pelo retângulo, água, café moído e filtro. Saem do sistema o café (a bebida), o café moído usado, o filtro usado e, ainda, vapor. A energia essencial ao processo é fornecida pela corrente elétrica que serve para aquecer a água evaporando-a e para atuar uma bomba (para elevar a água do depósito à caldeira onde esta é aquecida). Tal como no exemplo anterior, a energia elétrica é convertida em calor dando origem ao vapor que, atravessando o café moído condensa e adquire as propriedades do café. Após atravessar o filtro o condensado deposita-se no bule, resultando no produto final, o café (bebida). Como existem perdas de calor (para o ambiente exterior) em todo o processo, na Figura 6.5 representa-se energia térmica Q a sair (inclui-se neste termo o arrefecimento do café e filtro usados que se admitem removidos após arrefecimento até à temperatura ambiente).

A Figura 6.5 também inclui informação sobre o controlo e atuação da máquina de café. Com efeito, o processo de “fazer café” inicia após *actuar* o botão que liga a máquina. Este sinal de controlo

C_s (Control signal) é associado na figura à mão do operador Ac (Actuator), visto que os sinais de controlo são sempre transportados por fluxos de massa ou de energia. A máquina de café, por seu turno, possui um sensor de nível S_s (Sensor signal) que interrompe o funcionamento quando o nível de água é inferior a um valor limite. Esta interrupção é materializada via um atuador elétrico Ac_e que corta o fornecimento de energia elétrica.

Em processos que incluem mais de um equipamento é possível associar inputs e outputs de diferentes diagramas funcionais.

A representação de processos industriais por projetistas, utilizada para instalação, manutenção e desativação, não toma a forma de diagramas funcionais. Usam-se, antes, esquemas de princípio de: redes elétricas, redes de água quente, redes de refrigeração, ar comprimido, etc. A Figura 6.6 representa um esquema de princípio de produção de água quente. Para se ter uma ideia dos equipamentos que compõem a instalação, a Figura 6.7 apresenta fotografias do depósito de água quente e do grupo de bombagem.

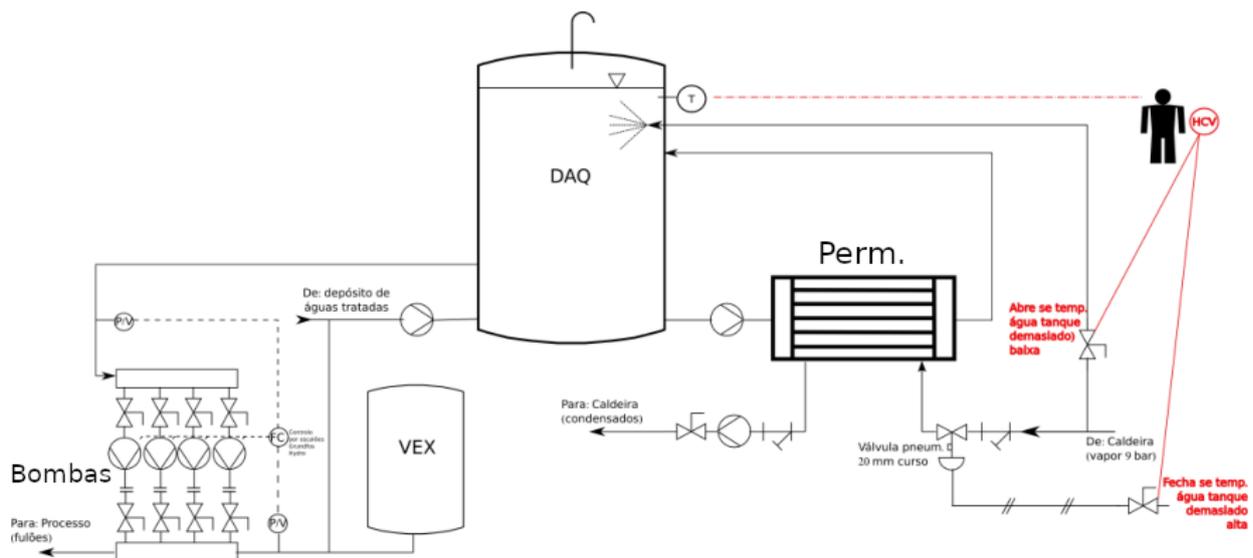


Figura 6.6: Esquema de princípio de processo de produção de água quente.

Para além do depósito (DAQ) e grupo de bombagem (Bombas, a que se associa um vaso de expansão, VEX), o processo representado inclui à direita um permutador de calor (Perm.) onde entra vapor vindo de uma caldeira. Este vapor transfere calor para a água que também circula no permutador vinda do depósito, condensando. Os condensados (e vapor) são reencaminhados para a caldeira. Porque a água do depósito que sai para o processo não percorre um circuito fechado, representa-se no lado esquerdo do depósito, por cima do vaso de expansão (VEX), a entrada de água de reposição oriunda de um depósito de águas tratadas.

No esquema da Figura 6.6 inclui-se a representação de acessórios de controlo como válvulas, sensores e atuadores. É igualmente comum incluir-se texto descrevendo características nominais dos fluidos, como a temperatura ou pressão de funcionamento/ máxi-



Depósito

Grupo de bombagem

Figura 6.7: Fotografias de depósito de água quente e grupo de bombagem.

mas, modelos de equipamentos, etc. Tratando-se de esquemas, o trajeto da tubagem e a escala a que se encontram representados os equipamentos não é a real.

A Figura 6.6 é um exemplo de uma “caixa branca” onde, usando simbologia normalizada se descreve em detalhe um processo. Este tipo de representação é muito importante em fase de projeto, permitindo a instalação e, posteriormente, sempre que se realizem operações de manutenção, renovação e desmantelamento. Porém, em contexto de auditoria energética, numa abordagem inicial o detalhe do esquema de princípio não é essencial, sendo suficiente o recurso a diagramas funcionais. Apenas em fases mais adiantadas da auditoria, identificados os principais consumidores de energia e, em que processos faz mais sentido investir em medidas URE, os esquemas de princípio podem ser úteis para comunicar as condições de funcionamento existentes e o mérito das alterações propostas. Não se exige do auditor, contudo, desenhos pormenorizados e telas finais, visto que não cabe a este a tarefa de dimensionamento.

Na Figura 6.8 apresenta-se o diagrama funcional para o processo de produção de água quente representado na Figura 6.6. Porque se considera o processo uma caixa negra, ignorando detalhes, obtém-se uma representação muito mais simples. Identificam-se a entrada de água, de vapor e a saída de água quente, vapor e condensados. Inclui-se ainda um sinal de controlo e de um sensor que dirige a atuação por um operador. Repare-se como se eliminam os pormenores do processo, designadamente, a permuta de calor vapor-água, o depósito onde se armazena a água quente, as redes que ligam estes equipamentos entre si e às bombas.

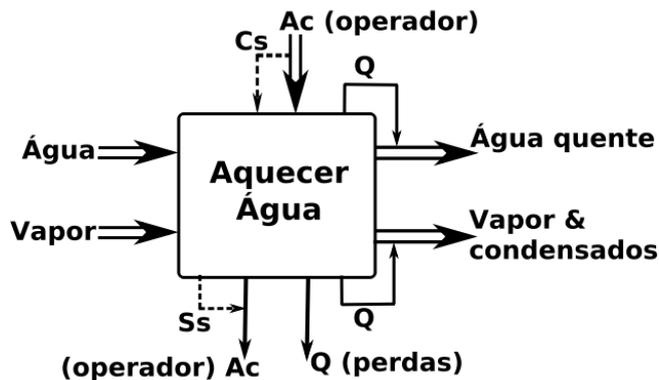


Figura 6.8: Diagrama funcional do processo de produção de água quente.

Identificados os fluxos de entrada e de saída de massa e de energia, com base em monitorização é possível associar valores numéricos aos fluxos de energia (e de massa) que entram e saem num determinado período de tempo (dia, semana, mês, ano). Conseguir-se deste modo estabelecer a contabilidade energética do processo e determinar consumos específicos (kWh por m^3 de água quente; kWh por bule de café).

Porque a energia trocada pode ser de diferente tipo, importa usar fatores de conversão para uma unidade padrão. No âmbito do SGCIE, a unidade de energia padrão é o tep, unidade de energia primária que, como explicado no Capítulo 5, possui uma natureza política. Assim se justificam as diferenças nos fatores de conversão para tep encontrados na Tabela 3.1 e aqueles no Aviso n.º 18670/2008 de 26 de junho. A Tabela 6.1, na margem, apresenta alguns fatores de conversão para tep retirados da legislação portuguesa.

6.3 Representação de consumos de energia em redes

Na caracterização de um processo produtivo, qualquer que ele seja, é possível identificar redes: redes constituídas por troços que unem nós e onde se transmite energia, massa ou informação.

Existem diferentes topologias ds redes. Atendendo à disposição dos troços que unem os nós definem-se redes emalhadas, como na Figura 6.9, onde os troços—segmentos $\overline{12}$, $\overline{13}$, $\overline{24}$, etc.—entre os nós—círculos 1 a 8—definem malhas fechadas ou anéis. Nestas redes um nó pode receber massa, energia ou informação por múltiplos trajetos alternativos. Por exemplo, o nó 1 na Figura 6.9 pode receber um caudal \dot{V} diretamente do exterior, como representado, ou de nós vizinhos pelos troços $\overline{12}$ ou $\overline{13}$.

Existe um outro tipo rede que possui uma natureza distinta; é o caso da rede representada na Figura 6.10 onde existe apenas um trajeto de abastecimento dos nós. Partindo do nó R na Figura 6.10 é possível confirmar que existe um único trajeto para atingir os nós de saída da rede (i.e., nós A, B, C1, C2, D1, D2, D3 e D4). Este tipo de redes toma a designação de rede em antena ou rede ramificada.

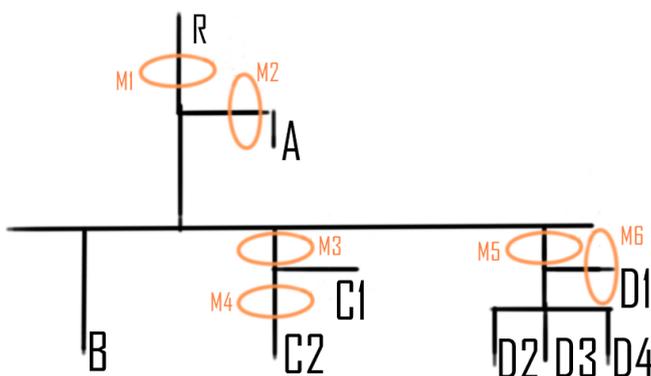


Figura 6.10: Representação de rede elétrica ramificada, com identificação dos pontos onde se fazem as medições M de valores de consumo (semanal, por exemplo).

Do Aviso n.º 18670/2008 de 26 de junho.

Material/ Energia	Fator
Combustível	PCI [tep/t]
Lenhite castanha	0,134~0,251
Carvão vegetal	0,705
Fuelóleo pesado	0,955~0,965
Gasóleo	1,010~1,034
Gasolina	1,051~1,075
Gás natural (a)	1,077
GPL	1,056~1,080
Energia	[tep/kWh]
Elétrica	215×10^{-6}

a) $\rho = 0,8404 \text{ kg/m}^3$.

Tabela 6.1: Factores de conversão em tep obtidos da legislação portuguesa (válidos em maio de 2022 para setor industrial).

Da Portaria n.º 228/90 de 27 de março têm-se as massa específicas do gasóleo ($0,835 \times 10^{-3} \text{ t/l}$) e da gasolina ($0,750 \times 10^{-3} \text{ t/l}$).

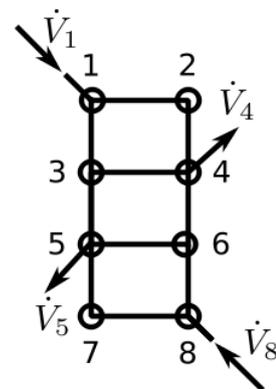


Figura 6.9: Rede emalhada (ou com anéis).

Na análise energética de processos industriais e, para a identificação de potenciais de poupança, é fundamental a capacidade de *desagregar*²⁸ consumos em diferentes troços da rede. Por exemplo, admitindo que a rede da Figura 6.10 recebe água quente no nó R, tratando-se os nós terminais de equipamentos consumidores de água quente, importa saber como se desagrega a energia que sai do nó R pelos consumidores A, B, C₁, C₂, etc. Com esta desagregação identificam-se os principais consumidores que são, igualmente, os consumidores prioritários aquando do estudo de medidas de poupança energética. Porquê prioritários? Porque pequenas reduções percentuais de consumo de energia podem representar poupanças significativas no processo.

A configuração em antena como na Figura 6.10 é muito comum em redes elétricas, de ar comprimido, sendo importante a sua representação esquemática e monitorização²⁹. Com um esquiço da rede e equipamento de monitorização está-se em condições de avaliar quais os valores quantitativos de consumos e partir, numa primeira fase, para a determinação da eficiência energética de sub-processos/ equipamentos. Numa segunda fase, evolui-se para a identificação das medidas com maior potencial de poupança.

Os métodos e equipamentos de monitorização variam consoante a rede em análise, mas os princípios que norteiam a monitorização são genéricos. Para redes em antena, onde troços da rede se podem bifurcar noutros, a monitorização pode realizar-se como se mostra na figura Figura 6.10—atentar nos círculos M.

Na Figura 6.10, para além do fornecimento de energia, R, incluem-se os consumidores A a D, subdividindo-se por sua vez os consumidores C e D. A monitorização desta rede pode ser conseguida com as medições M₁ a M₆ nos pontos indicados (uma possibilidade entre muitas). Não é necessário medir o consumo em todos os consumidores visto que se podem deduzir consumos da diferença entre o consumo a montante e o consumo nos restantes troços abastecidos pelo mesmo troço.

Note-se que numa rede real é habitual existirem muitas mais ramificações, não existindo (usualmente) equipamento suficiente para monitorizar a totalidade da rede. É por isso habitual fazer medições pontuais prévias para determinar os principais consumidores e agrupar consumidores da mesma natureza que se estima possuam consumos idênticos.

A título de exemplo, a Tabela 6.2 apresenta valores de consumo de energia, monitorizado ao longo de uma semana na rede da Figura 6.10. Os valores a negrito foram determinados de diferenças entre os monitorizados. Admitiu-se consumos em D₂, D₃ e D₄ semelhantes.

Com base nos dados da Tabela 6.2 é possível obter a Figura 6.11, um diagrama de Sankey³⁰, que representa os fluxos de energia associando-os à largura das bandas que unem o nó R aos restantes.

²⁸Desagregar: Desunir ou desunir-se o que estava agregado ou junto. Separar. (in <https://dicionario.priberam.org/>)

²⁹Monitorizar: Fazer vigilância e acompanhamento de. Supervisionar. Dotar de monitor. (in <https://dicionario.priberam.org/>)

Troço	Consumo	Obs.
R	870	M ₁ (medido)
A	70	M ₂ (medido)
B	460	M ₁ -M ₂ -M ₃ -M ₅
C	250	M ₃ (medido)
↔C ₁	150	M ₃ -M ₄
↔C ₂	100	M ₄ (medido)
D	90	M ₅ (medido)
↔D ₁	30	M ₆ (medido)
↔D ₂	20	(M ₅ -M ₆)/3
↔D ₃	20	(M ₅ -M ₆)/3
↔D ₄	20	(M ₅ -M ₆)/3

Tabela 6.2: Consumo de energia monitorizado na rede da Figura 6.10.

³⁰Sobre a distinção entre os diagramas de Sankey e aqueles de Grassmann, usados no Capítulo 3, ver <https://www.sankey-diagrams.com/grassmann-diagrams/>

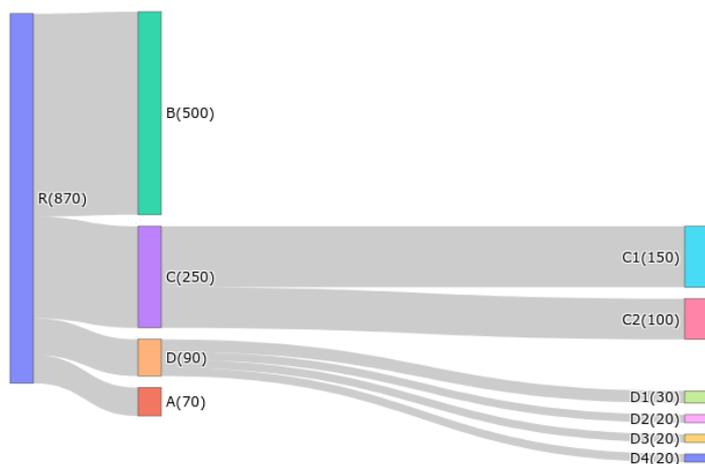


Figura 6.11: Diagrama de Sankey para os dados da Tabela 6.2.

Pode confirmar-se que os principais consumidores são os sub-processos/ equipamentos B e C. Se B, C e D representassem diferentes subprocessos de um determinado processo produtivo (e A tivesse uma natureza diferente; fosse um serviço, por exemplo, produção de ar comprimido), gráficos de setores circulares como o representado na Figura 6.12 permitem uma avaliação rápida da repartição dos consumos por subprocesso.

Na Figura 6.12 destaca-se o consumo no subprocesso B, representando 59,5% do conjunto dos subprocessos. Identificado o principal consumidor, será por esse que se deve iniciar a procura de medidas de poupança energética, já que mesmo uma pequena poupança, da ordem das unidades de percentagem, multiplicada pelo elevado consumo representará uma poupança significativa.

Os códigos (Julia) para produzir as Figuras 6.11 e 6.12 são:

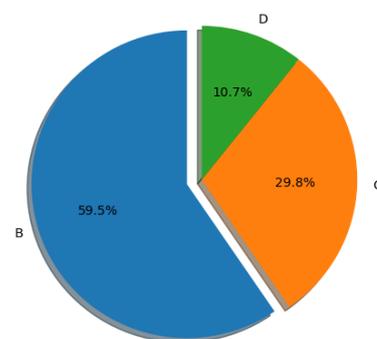


Figura 6.12: Gráfico de setores circular com os dados de consumo dos subprocessos B, C e D.

```
#Gráfico Sankey-----
using PlotlyJS
plotsankey=plot(sankey(
    arrangement = "snap",
    node = attr(
        label= ["R(870)", "A(70)", "B(500)", "C(250)", "D(90)",
            "C1(150)", "C2(100)", "D1(30)", "D2(20)", "D3(20)",
            "D4(20)"],
        x= [0.0, 0.2, 0.2, 0.2, 0.2, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0,
            0.0],
        y= [0.0, 0.2, 0.2, 0.2, 0.2, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0,
            0.0],
        pad=10, # 10 Pixels
    ),
    link = attr(
        source= [0, 0, 0, 0, 3, 3, 4, 4, 4, 4],
        target= [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10],
        value= [70, 500, 250, 90, 150, 100, 30, 20, 20, 20]
    ))
)
```

```
#Gráfico setores circular-----
using PyCall
using PyPlot
pygui(true)
pygui(:qt5)
labels = ("B", "C", "D")
sizes = [500, 250, 90]
explode = (0.1, 0, 0) # only "explode" the 1st slice
fig1, ax1 = plt.subplots()
ax1.pie(sizes, explode=explode, labels=labels, autopct="%1.1f%%",
        shadow=true, startangle=90)
ax1.axis("equal")
plt.show()
```

6.4 Diagramas de carga: Determinação de consumos de energia

Na Tabela 6.2 e ao longo da secção anterior consideraram-se valores de consumo de energia, E , para um dado período de tempo; um dia, uma semana, um mês, um ano. Estes valores são, por exemplo, o kWh que podemos visualizar nos contadores de eletricidade de nossas casas. O processo de medição da energia consiste na integração da potência $\dot{E} = E/\Delta t$ no período de tempo Δt . Na Figura 6.13 apresenta-se um excerto do registo da potência elétrica consumida num compressor entre o instante inicial $t_1 = 14$ h e o instante final $t_2 = 15$ h. A energia consumida neste período de tempo será a integração dos valores de potência,

$$E = \int_{t_1}^{t_2} \dot{E} dt, \quad (6.1)$$

ou seja, a área assinalada abaixo da curva original como representado na Figura 6.14.

Havendo registos de potência consumida em intervalos de 1 segundo, 10 minutos, 1 hora³¹, por integração numérica, usando a regra do ponto médio, trapezoidal, de Simpson, ou outra, consegue-se determinar a energia consumida. Na Nota 6.4 descreve-se a regra trapezoidal.

[Nota 6.4]

Integração numérica: Regra trapezoidal

Seja $\dot{E}(t)$ a função a integrar com valores conhecidos nos instantes t_i e $i = 1, 2, \dots, k-1, k, \dots, n$, o integral de $\dot{E}(t)$ no intervalo $[t_{k-1}, t_k]$ é aproximado com a regra trapezoidal por,

$$\int_{t_{k-1}}^{t_k} \dot{E}(t) dt \approx (t_k - t_{k-1}) \frac{\dot{E}(t_k) + \dot{E}(t_{k-1})}{2}.$$

Esta expressão descreve na figura abaixo a área do trapézio azul que aproxima a área abaixo da curva $\dot{E}(t)$, a vermelho, em $[t_{k-1}, t_k]$.

[Nota 6.4]

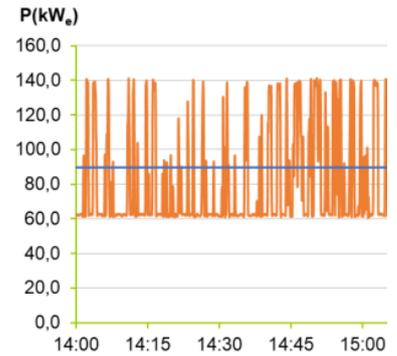


Figura 6.13: Potência elétrica consumida num compressor [Excerto retirado de Sampaio, 2019].

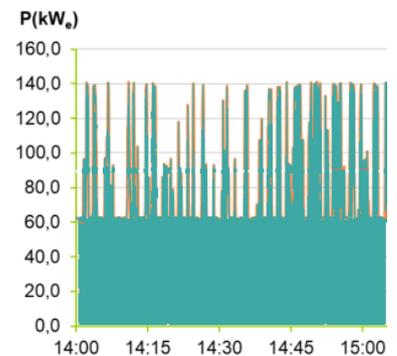
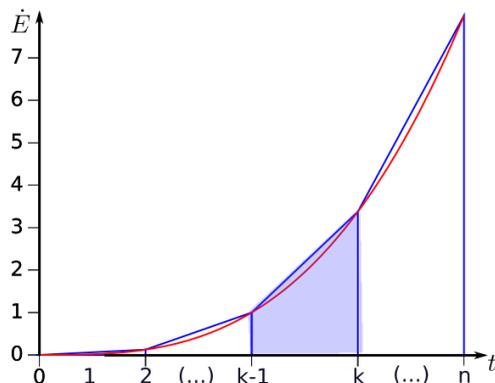


Figura 6.14: Área abaixo da curva de potência definindo a energia consumida.

³¹A seleção do intervalo de amostragem deve ter em consideração a variabilidade no tempo da variável a medir—ver <https://en.wikipedia.org/wiki/Aliasing>

[Nota 6.4]

Usando expressões análogas na determinação das áreas de todos os trapézios definidos entre t_0 e t_n e somando estas áreas aproxima-se o integral abaixo da totalidade da curva vermelha.

**[Nota 6.4]**

Considerem-se os dados da Tabela 6.3, registos horários de temperatura de água num depósito de água quente. Se admitirmos que o depósito abastece o processo com uma caudal de 3 l/s (litros por segundo) e que a água de reposição do depósito (com caudal igual ao caudal que abastece o processo) é obtida de um furo de captação com água a 15°C, usando a expressão,

$$\dot{Q}(t) = \dot{m}c(T_H(t) - T_C), \quad (6.2)$$

com $c_p = 4,180 \text{ kJ/kg/}^\circ\text{C}$, T_H e T_C as temperaturas da água quente que sai do depósito e da água fria que entre no depósito, respetivamente, é possível obter a potência calorífica a fornecer à água de reposição, \dot{Q} .

Com estes valores de potência horária, aplicando a Equação (6.1) obtém-se a energia (3210 kWh, considerando a regra trapezoidal) usada no processo de aquecimento de água.

O código usado na obtenção do valor de energia é apresentado abaixo. Inclui-se, ainda, o código usado para gerar a Figura 6.15, que mostra a evolução do consumo de energia no tempo, valores do integral acumulados entre o instante inicial e final. Note-se como no final das 10h se tem o consumo indicado acima, 3210 kWh.

```
using Plots
using NumericalIntegration
t=collect(0:1:10)
T_h=[30, 24, 34, 37, 36, 40, 41, 45, 52, 56, 52]
dotm=3*3600 # Expresso em kg/h; 1 litro de água doce pesa 1 kg
cp=4180/3.6e6 # Expresso em kWh/kg/C
T_c=15
dotE=dotm*cp*(T_h.-T_c) # Expresso em kWh/h = kW
E=NumericalIntegration.integrate(t, dotE)
E_t = NumericalIntegration.cumul_integrate(t, dotE)
plotCumulE=Plots.plot(
    t,E_t.-E_t[1], # subtracao vetorial do primeiro valor do
```

Tempo [h]	Temperatura [°C]
0	30
1	24
2	34
3	37
4	36
5	40
6	41
7	45
8	52
9	56
10	52

Tabela 6.3: Temperaturas num depósito de água quente.

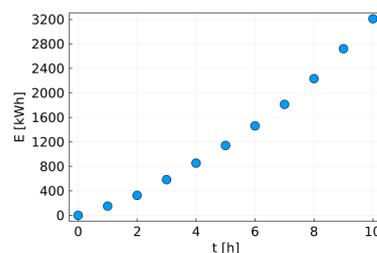


Figura 6.15: Evolução temporal do consumo de energia para produção de água quente.

```

integral acumulado
seriestype = :scatter,
framestyle = :box,
markersize = 8,
legend=false,
xlabel="t [h]",
xguidefontsize=14,
xticks=0:2:10,
xtickfontsize=14,
ylabel="E [kWh]",
yguidefontsize=14,
yticks=0:400:3600,
ytickfontsize=14
)

```

Hoje em dia, face ao desenvolvimento da eletrónica e à redução do preço desta tecnologia, os equipamentos de monitorização (analisadores de energia, analisadores entálpicos) para além de registar as potências determinam também a energia consumida. Contudo, compreender e ser capaz de realizar estes cálculos será sempre uma mais valia para um auditor energético.

6.5 Contabilidade energética: Retas de regressão

Para além da capacidade de determinar um integral abaixo de uma curva, outras competências recolhidas em unidades curriculares de matemática e análise numérica são importantes para o auditor energético. Nesta secção aborda-se a obtenção de retas de regressão.

A regressão linear simples admite que uma função $y = f(x)$ pode ser aproximada por

$$y = \alpha + \beta x, \quad (6.3)$$

descrevendo uma reta de declive β e coordenada na origem α .

Em geral, medições pontuais y_i desta função em x_i , onde $i = 1, 2, \dots, n$, não se ajustam perfeitamente à reta da Equação (6.3), sendo um modelo melhor ajustado definido por,

$$y_i = \alpha + \beta x_i + \varepsilon_i, \quad (6.4)$$

com ε_i o erro (ou resíduo) entre o ponto sobre a reta de regressão em x_i e o par ordenado (x_i, y_i) realmente medido.

Num modelo de regressão linear o objetivo é estimar os valores $\hat{\alpha}$ e $\hat{\beta}$ para os parâmetros α e β de tal forma que o erro ε seja mínimo.

Da Equação (6.4) obtém-se a função,

$$\hat{\varepsilon}_i = y_i - \alpha - \beta x_i \quad (6.5)$$

para os erros. Uma vez que existem tantos erros quantos os pontos i e atendendo a que estes podem ser positivos ou negativos, no

método dos (erros) mínimos quadráticos a minimização faz-se com a função quadrática,

$$Q(\alpha, \beta) = \sum_{i=1}^n \hat{\varepsilon}_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \alpha - \beta x_i)^2 ; \quad (6.6)$$

sendo o objetivo estimar os parâmetros α e β que minimizam a função $Q(\alpha, \beta)$. Estas estimativas são os acima referidos $\hat{\alpha}$ e $\hat{\beta}$.

Da resolução do problema de minimização $\min_{\alpha, \beta} Q(\alpha, \beta)$ resulta,

$$\hat{\alpha} = \bar{y} - \hat{\beta} \bar{x} , \quad (6.7)$$

$$\hat{\beta} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} , \quad (6.8)$$

com $\bar{x} = 1/n \cdot \sum_{i=1}^n x_i$ e $\bar{y} = 1/n \cdot \sum_{i=1}^n y_i$ os valores médios de x_i e y_i , respetivamente.

Desenvolvendo o numerador e denominador da Equação (6.8) e substituindo as expressões acima para \bar{x} e \bar{y} resulta,

$$\hat{\alpha} = \frac{1}{n} S_y - \hat{\beta} \frac{1}{n} S_x , \quad (6.9)$$

$$\hat{\beta} = \frac{n S_{xy} - S_x S_y}{n S_{xx} - S_x^2} , \quad (6.10)$$

onde,

$$\begin{aligned} S_x &= \sum x_i , & S_y &= \sum y_i , \\ S_{xx} &= \sum x_i^2 , & S_{yy} &= \sum y_i^2 , \\ S_{xy} &= S_{yx} = \sum x_i y_i . \end{aligned}$$

O coeficiente de determinação (vulgarmente representado por R^2) é dado por r_{xy}^2 , com o coeficiente de correlação r_{xy} determinado da expressão,

$$r_{xy} = \frac{n S_{xy} - S_x S_y}{\sqrt{(n S_{xx} - S_x^2)(n S_{yy} - S_y^2)}} . \quad (6.11)$$

Vejamos como se aplicam estas expressões no estudo do consumo de energia de uma empresa.

Na Tabela 6.4 incluem-se dados mensais de produção, x_i , e de consumo de energia, y_i . A Figura 6.16 representa estes dados.

Mês	Prod., x_i [unidades]	Cons., y_i [tep]
1	8	49
2	5	45
3	1	38
4	6	42
5	4	30
6	11	59
7	9	58
8	7	46
9	2	33
10	3	31
11	12	51
12	10	43

Tabela 6.4: Valores de produção e de consumo de energia mensal de uma empresa ao longo de um ano.

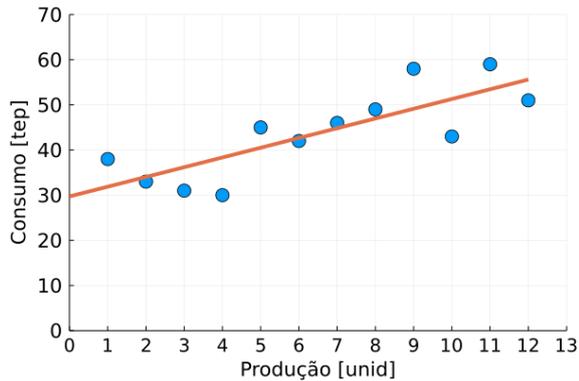


Figura 6.16: Relação entre produção e consumo de energia mensal.

Para além dos valores mensais de consumo a figura inclui a reta de regressão que melhor ajusta esses pontos, cuja equação é,

$$\text{cons}[\text{tep}] = 29,727 + 2,157 \cdot \text{prod}[\text{unid}],$$

com $\hat{\alpha} = 29,727$ tep, $\hat{\beta} = 2,157$ tep/unid e coeficiente de determinação $R^2 = 0,648$.

Na obtenção destes resultados podem usar-se as equações 6.9 a 6.11, com $n = 12$ e valores dos somatórios S_x , S_{xx} , S_{xy} , etc. determinados a partir dos dados mensais da Tabela 6.4. No caso concreto da Figura 6.16, optou-se por usar as *packages* GLM e Plots do Julia. O código usado é apresentado de seguida.

```
using DataFrames, GLM, Plots
mes=collect(1:1:12)
prod=[8, 5, 1, 6, 4, 11, 9, 7, 2, 3, 12, 10]
energ=[49, 45, 38, 42, 30, 59, 58, 46, 33, 31, 51, 43]
data = DataFrame(y=energ, x=prod)
model_est=lm(@formula(y ~ x), data)
alpha, beta = coef(model_est)
R2=r2(model_est)
energ_est=predict(model_est, DataFrame(x = collect(0:1:12)))
plotScatter=Plots.plot(
    prod,energ,
    seriestype = :scatter,
    legend=false,
    markersize = 8,
    xlabel="Producao [unid]",
    xguidefontsize=14,
    xlims = (0,13),
    xticks=0:1:13,
    xtickfontsize=13,
    ylabel="Consumo [tep]",
    yguidefontsize=14,
    ylims = (0,70),
    yticks=0:10:70,
    ytickfontsize=14
)
Plots.plot!(collect(0:1:12),energ_est, linewidth=4)
```

Da Figura 6.16 fica patente a grande variabilidade do consumo.

Apesar de existir uma tendência para este aumentar com a produção, observam-se meses com produção reduzida e, ainda assim, um consumo elevado. Este comportamento está normalmente associado a consumos fixos elevados (dos serviços, como produção de vapor; de ar comprimido) que acabam por mascarar a componente variável de consumo que depende da produção. O valor de $\hat{\alpha} = 29,727$ tep, a ordenada na origem, corresponde ao consumo com produção nula, servindo como indicador da ordem de grandeza da componente fixa de consumos. Um dos propósitos da auditoria energética será, portanto, reduzir estes consumo fixos.

O valor do declive $\hat{\beta} = 2,157$ tep/unid depende muito do processo produtivo, contudo, comparando processos semelhantes, será mais eficiente aquele com menor declive.

6.6 Exercícios resolvidos e propostos

— [Exercício resolvido 6.1] —

Considere os valores de temperatura de água quente da Tabela 6.3, secção 6.4, relativos a um processo industrial que requer a produção de água quente. Admitindo o consumo de água de 3 l/s e a necessidade de aquecer a água de reposição obtida de um furo de captação a 15°C, confirme o valor de 3210 kWh de energia consumida nas 10 horas para produção de água quente. Admita $c_p = 4,180 \text{ kJ/kg/}^\circ\text{C}$ e $\rho \approx 1000 \text{ kg/m}^3$.

Resolução:

Em alternativa à resolução assente no código `Julia`, na secção 6.4, pode construir-se a tabela abaixo que produz o resultado pretendido.

t [h]	T_H [°C]	$T_H - T_C$ [°C]	\dot{Q} [kW] (a)	$\int \dot{Q} dt$ [kWh] (b)
0	30	15	188	—
1	24	9	113	150,5
2	34	19	238	175,5
3	37	22	276	257
4	36	21	263	269,5
5	40	25	314	288,5
6	41	26	326	320
7	45	30	376	351
8	52	37	464	420
9	56	41	514	489
10	52	37	464	489
			$\Sigma =$	3210

(a) Usar Equação (6.1). (b) Aproximado por expressão na Nota 6.4 com $\Delta t = 1 \text{ h}$.

— [Exercício resolvido 6.1] —

— [Exercício resolvido 6.2] —

A Tabela 6.4, secção 6.5, apresenta para os 12 meses de um ano pares produção–consumo-de-energia numa empresa.

a) Trata-se de um empresa consumidora intensiva de energia? Justifique.

b) Qual o consumo específico da empresa no ano em análise?

Com base nas expressões (6.9) a (6.11) da secção 6.5 determine:

c) Qual o valor do coeficiente $\hat{\beta}$, o declive da reta de regressão?

d) Qual o valor do coeficiente $\hat{\alpha}$, a ordenada na origem da reta de regressão?

e) Qual o valor do coeficiente de correlação $r_{x,y}$ (a raiz quadrada do coef. de determinação, R^2) expresso em percentagem?

f) Represente num gráfico produzido por si os pares Produção–Consumo e a reta de regressão linear.

Que interpretação pode dar ao valor $\hat{\alpha}$?

Resolução:

a) O somatório dos consumos mensais é, $\sum_{\text{mês}=1}^{12} \text{consumo(mês)} = 525 \text{ tep}$. Como este consumo anual excede os 500 tep, *sim*, trata-se de uma empresa CIE.

b) Consumo específico = $\frac{\sum_{\text{mês}=1}^{12} \text{consumo(mês)}}{\sum_{\text{mês}=1}^{12} \text{produção(mês)}} = \frac{525}{78} = 6,77 \text{ tep/unid.}$

— [Exercício resolvido 6.2] —

[Exercício resolvido 6.2]

- c) Para responder às alíneas (c) a (e)—sem recurso ao código `Julia` da secção 6.5—constrói-se a tabela abaixo para facilitar o uso das expressões (6.9) a (6.11). Faz-se corresponder o par ordenado (Produção mensal, Consumo mensal) a (x_i, y_i) .

Mês, i	x_i	x_i^2	y_i	y_i^2	$x_i y_i$
1	8	64	49	2401	392
2	5	25	45	2025	225
3	1	1	38	1444	38
4	6	36	42	1764	252
5	4	16	30	900	120
6	11	121	59	3481	649
7	9	81	58	3364	522
8	7	49	46	2116	322
9	2	4	33	1089	66
10	3	9	31	961	93
11	12	144	51	2601	612
12	10	100	43	1849	430
n	S_x	S_{xx}	S_y	S_{yy}	S_{xy}
12	78	649	525	23995	3721

Usando os somatórios na última linha da tabela, da Equação (6.10) obtém-se, $\hat{\beta} = 2,17$ tep/unid.

- d) Usando os somatórios na última linha da tabela e o valor $\hat{\beta}$ determinado na alínea anterior, da Equação (6.9) obtém-se, $\hat{\alpha} = 29,64$ tep.
- e) Da Equação (6.11) resulta, $r_{x,y} = 0,808 = 80,8\%$ e $R^2 = 0,653 = 65,3\%$
- f) Os pares ordenados *estimados* (Produção mensal, Consumo mensal *estimado*) que se pretende comparar com os valores da Tabela 6.4 são obtidas de (x_i, \hat{y}_i) , com valores \hat{y}_i determinados da reta de regressão na forma $\hat{y}_i = 29,64 + 2,17x_i$, onde se substituem os valores de produção x_i da Tabela 6.4.

O gráfico—idêntico à Figura 6.16—pode ser obtido com as instruções `Julia` da secção 6.5 ou usando planilhas de cálculo, sendo construído a partir dos valores na seguinte tabela.

Mês	Produção	Consumo	Consumo estimado
i	x_i	y_i	\hat{y}_i
1	8	49	47
2	5	45	40
3	1	38	32
4	6	42	43
5	4	30	38
6	11	59	54
7	9	58	49
8	7	46	45
9	2	33	34
10	3	31	36
11	12	51	56
12	10	43	51

[Exercício resolvido 6.2]

[Exercício resolvido 6.2]

Apesar de não ser boa a aproximação do vetor \hat{y} obtido por regressão ao vetor medido y — aproximações boas possuem coeficientes de determinação R^2 superiores a 70%—, a visualização dos dados com a reta de regressão é suficiente para concluir que os custos fixos de energia, aqueles que não dependem da quantidade produzida, são elevados. O valor elevado de $\hat{\lambda}$, a ordenada da reta de regressão na origem, traduz quantitativamente estes elevados custos fixos.

— **[Exercício resolvido 6.2]** —**[Exercício proposto 6.1]**

Note-se que do ponto de vista funcional (esquecendo o volume das matérias primas processadas), processos industriais possuem análogos nas nossas casas. Viram-se na secção 6.2 os exemplo do secador de cabelo e da máquina de fazer café.

Propõe-se a representação do diagrama funcional dos seguintes processos:

- Cozer um ovo.
- Preparar uma meia de leite (medida de leite com café de máquina comum em Portugal, servida em chávena larga).
- Preparar uma torrada.
- Integrar os processos anteriores num único processo designado “Preparar o pequeno almoço.”

Nos seus diagramas funcionais inclua inputs e outputs de massa e de energia e, sinais de controlo (sempre transportados nos fluxos de massa ou energia).

É livre de escolher o processo concreto (por exemplo, a meia de leite pode ser produzida com uma máquina de café expresso sendo posteriormente adicionado leite ou, ser obtida dissolvendo café em leite quente.). Porém, deve tornar claros inputs e outputs e seleccionar frases esclarecedoras para as funções desempenhadas.

— **[Exercício proposto 6.1]** —**[Exercício proposto 6.2]**

Monitorizam-se os consumos de energia elétrica numa empresa com três processos principais, A, B e C, possuindo o processo B dois subprocessos, B1 e B2. Na tabela abaixo apresentam-se os dados recolhidos, com R representando o consumo medido no quadro geral da empresa.

Processo	Consumo monitorizado [MWh]
R	209
A	120
B1	34
B2	11
C	n.d.

- a) Produza um diagrama em antena representativo dos processos monitorizados.
- b) Qual o consumo energético no processo C (em MWh)?
- c) Qual o processo onde procuraria encontrar medidas de Utilização Racional de Energia em primeiro lugar? [A/ B/ C]
- d) Produza um gráfico de Sankey que desagregue o consumo energético na empresa por processos e subprocessos.
- e) Obtenha um gráfico de setores representativo da importância relativa do consumo energético nos subprocessos B.

— **[Exercício proposto 6.2]** —

[Exercício proposto 6.3]

Nota prévia: Na tabela abaixo faz-se um breve resumo de legislação na área da energia com enfoque na indústria. Adverte-se, porém, para o facto da legislação sofrer alterações, desatualizando o conteúdo da tabela. Assim, deve consultar o sítio <https://dre.pt/dre/home>, procurando, sempre que existam, as versões consolidadas; aquelas que refletem todas as alterações ocorridas na legislação ao longo dos anos.

Âmbito	Legislação
Reg.Gest.Energ.Transportes (com massas específicas)	Portaria n.228/90 de 27 de março
Decreto Lei que regula SGCIE	Decreto-Lei n.71/2008 de 15 de abril
Credenciação de técnicos e entidades	Portaria n.519/2008 de 25 de junho
Fatores de conversão	Aviso n.18670/2008 de 26 de junho
Objetivos da auditoria energética	Despacho n.17449/2008 de 27 de junho
Sobre emissões de CO ₂	Portaria n.1530/2008 de 29 de dezembro de 2008
Serviços energéticos por terceiros	Decreto-Lei n.319/2009 de 3 de novembro
Credenciação de técnicos e entidades (SGCIE e Transportes)	Lei n.7/2013 de 22 de janeiro
Sobre cogeração	Decreto-Lei n.68-A/2015 de 30 de abril

Secundando a exposição realizada neste capítulo com a consulta de legislação portuguesa na área da energia, seleccione as opções adequadas às afirmações.

Ao abrigo do SGCIE as empresas consumidoras intensivas de energia são obrigadas a:

[V/ F], Fazer registo de instalação no portal;

[V/ F], Contratar auditoria energética e plano de racionalização de energia;

[V/ F], Enviar Plano de Racionalização de Consumo de Energia a ADENE para estabelecer contrato de redução dos consumos;

[V/ F], Executar os PREn aprovados.

Estão ao abrigo do SGCIE, instalações industriais que consumam mais de [250/ 500/ 750/ 1000] tep no ano civil transato. Entre estas, distinguem-se dois casos:

- As que consomem **menos** de [500/ 1000/ 10000] tep/ano, devendo realizar auditorias todos os [4/ 6/ 8] anos, estando obrigadas a reduzir o consumo específico em [4/ 6/ 8]% mantendo a intensidade carbónica;

- As que consomem **mais** de [500/ 1000/ 10000] tep/ano, devendo realizar auditorias todos os [4/ 6/ 8] anos, estando obrigadas a reduzir o consumo específico em [4/ 6/ 8]% mantendo a intensidade carbónica.

No que diz respeito ao procedimento estipulado no SGCIE, ordene cronologicamente de 1 até 5 as tarefas a realizar pela instalação CIE:

[1/ 2/ 3/ 4/ 5], Registo da instalação no prazo de 4 meses.

[1/ 2/ 3/ 4/ 5], De 2 em 2 anos, redação de Relatório de Execução e Progresso para análise por DGEG.

[1/ 2/ 3/ 4/ 5], Submissão de PREn a DGEG para aprovação e celebração de Acordo de Racionalização dos Consumos de Energia.

[1/ 2/ 3/ 4/ 5], Contratação de auditoria energética a entidade auditora ou a auditor.

[1/ 2/ 3/ 4/ 5], Discussão de auditoria com auditor de energia e redação de Plano de Racionalização de Energia.

[Exercício proposto 6.3]

[Exercício proposto 6.3]

Quanto aos objetivos da auditoria energética, estes são:

- [V/ F], Determinar formas de energia utilizadas;
- [V/ F], Determinar o valor acrescentado bruto na empresa;
- [V/ F], Quantificar consumos energéticos e respetivos custos;
- [V/ F], Analisar criticamente a evolução dos custos de produção;
- [V/ F], Desagregar os consumos por setores produtivos, processos e equipamentos;
- [V/ F], Analisar criticamente o consumo energético face aos níveis de produção;
- [V/ F], Impor medidas de utilização racional de energia;
- [V/ F], Identificar medidas de utilização racional de energia;
- [V/ F], Propor medidas de URE técnica e economicamente viáveis;
- [V/ F], Encontrar financiamento para a implementação das medidas URE propostas;
- [V/ F], Sugerir um programa/ calendário de implementação das ações e investimentos em URE a efetuar.

Estes objetivos da auditoria energética podem ser ordenados num documento com as seguintes secções (ordene-as de 1 a 4 pela ordem que surgem no índice):

- Secção [1/ 2/ 3/ 4], Descrição de medidas de URE
- Secção [1/ 2/ 3/ 4], Contabilidade energética
- Secção [1/ 2/ 3/ 4], Informação base sobre a empresa
- Secção [1/ 2/ 3/ 4], Exame da instalação

7

Conclusão^[‡]

[‡] Capítulo redigido em co-autoria com Ângela Lacerda-Nobre e Fernando Pimentel.

Neste documento mostrou-se como a energia afeta a segurança dos estados, o bem estar dos cidadãos e viu-se como os estados implementam políticas energéticas regulando através de legislação e fomentando com incentivos fiscais, o uso de materiais e de tecnologias mais eficientes e menos poluidoras.

Apresentaram-se, também, ferramentas que permitem avaliar as políticas energéticas implementadas e criticar a evolução do consumo de energia.

O tom adotado nos textos apresentados é de confiança nas ferramentas apresentadas e de confiança na capacidade de se reduzir o consumo de energia pelo aumento da eficiência energética, gradualmente, sem dramatismo.

Mas a “questão energética” que cada cidadão, individualmente, e que as nações em conjunto têm pela frente é muitas vezes interpretada com desconfiança na tecnologia e, por muitos, encarada com dramatismo. Com efeito, apesar dos progressos tecnológicos espantosos que permitem aumentar a eficiência energética, pode dar-se o caso destes avanços serem contrários à redução do consumo. Trata-se de um efeito conhecido como o paradoxo de Jevons³², devendo este nome ao economista que concluiu terem as melhorias no rendimento de equipamentos como consequência a expansão do uso destes, que, mais baratos, permitem a diversificação do seu uso em novas aplicações e, pelo aumento do volume de vendas, conduzem a um aumento do consumo de energia. Ou seja, as melhorias técnicas que visaram o aumento da eficiência energética resultaram, afinal, num aumento do consumo de energia.

³²Ver https://en.wikipedia.org/wiki/Jevons_paradox

A lógica por detrás do paradoxo de Jevons encontra-se explicada no **Exercício resolvido 5.1**, no tom impessoal habitual em exercícios académicos. Contudo, não é preciso um grande esforço para reconhecer que convivemos de perto com este paradoxo. Basta pensar no aumento do rendimento dos motores de combustão dos nossos automóveis, que nos deixam percorrer mais quilómetros; nos nossos frigoríficos mais eficientes mas, simultaneamente, maiores; nas casas melhor isoladas mas, simultaneamente, maiores e com maior área de perda de calor.

Isto não significa que não se deva investir na eficiência energética; apenas que, por si só, a eficiência não basta para reduzir o

consumo de energia.

Recordando a secção 1.2 e os termos das equações (1.9) e (1.11), constata-se que os *fatores tecnológicos* associados à eficiência da produção de bens e serviços; associados à produção de energia final e a aspetos comportamentais, concorrem junto com o aumento da população e o rendimento *per capita* para a variação do consumo de energia. Segundo Hall and Klitgaard [2018] a promoção da eficiência energética tem de ser acompanhada de medidas sociais como a contenção do crescimento da população mundial e a estabilização do crescimento económico.

De acordo com Meadows et al. [1972], o crescimento económico como o conhecemos não é sustentável. A Figura 7.1 apresenta projeções obtidas por estes investigadores nos anos 1970 para a evolução (mundial) da população, poluição, recursos alimentares *per capita*, produção industrial *per capita* e disponibilidade de recursos.

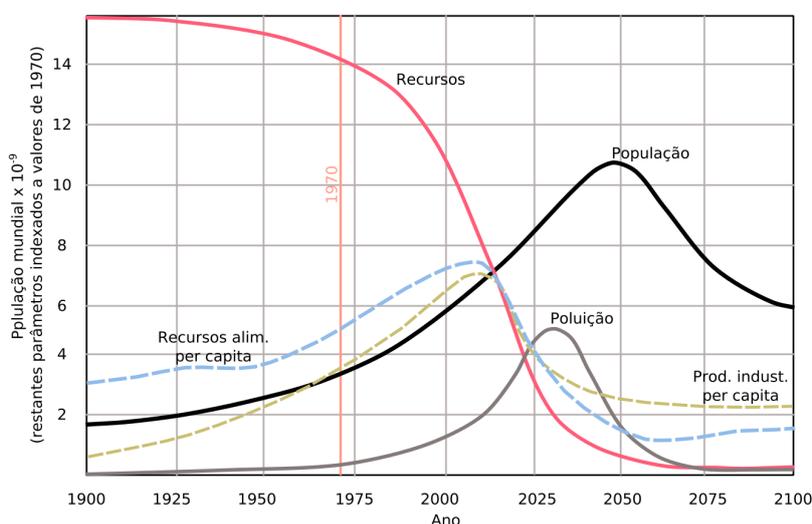


Figura 7.1: Projeções obtidas com o modelo “limites de crescimento”, desenvolvido nos anos 1970 [in Hall and Klitgaard, 2018, p.284].

Na Tabela 7.1, na margem, comparam-se no ano de 2008 resultados previstos com o modelo “limites de crescimento” com dados reais. Não deixa de ser assustador o bom ajuste do modelo de “limite de crescimento”, especialmente se atendermos à “montanha russa” prevista para as décadas 2020 a 2050, com a redução drástica dos recursos naturais, da produção industrial e, da população mundial.

Com efeito, a existência de um teto para o crescimento surge como consequência natural dos crescimentos exponenciais descritos nas secções iniciais do Capítulo 1, num sistema—a Terra—que não dispõe de recursos infinitos (recordar a conclusão da Nota 1.1).

Analisando o crescimento económico nas economias desenvolvidas—ver Figura 7.2—constata-se que este tem sido anémico; reduzindo também na China desde os anos 2010.

Parâmetro	Previsão	Real(2008)
População	$6,9 \cdot 10^9$	$6,7 \cdot 10^9$
Natalidade por 1000 hab.	29	20
Mortalidade por 1000 hab.	11	8,3
[Considerando ano 1970 como referência]		
Recursos	0,53	
Cobre		0,5
Petróleo		0,5
Solo		0,7
Pescado		0,3
Poluição	3,0	
CO ₂		2,1
Azoto		2
Prod.industrial per capita	1,8	1,9

Tabela 7.1: Comparação entre previsões obtidas com o modelo “limites de crescimento” e valores reais no ano de 2008 [Hall and Klitgaard, 2018].

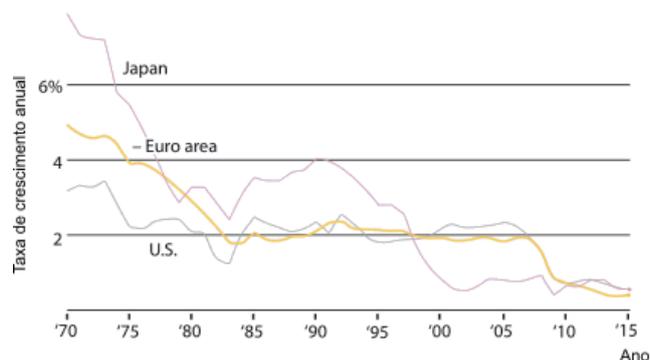


Figura 7.2: Redução do crescimento económico no Japão, União Europeia e Estados Unidos da América [in Hall and Klitgaard, 2018, p.93].

Esta redução do crescimento em países desenvolvidos, habituados a energia fóssil barata é indissociável dos custos crescentes das matérias primas, em geral, e dos combustíveis fósseis, em particular. Note-se na Figura 7.3, pelo andamento da curva tracejada representando descobertas de reservas de petróleo³³ ao longo do tempo, como se atingiu um patamar máximo.

³³Trata-se de petróleo “convencional”, excluindo-se o petróleo obtido por fratura hidráulica, *fracking*.

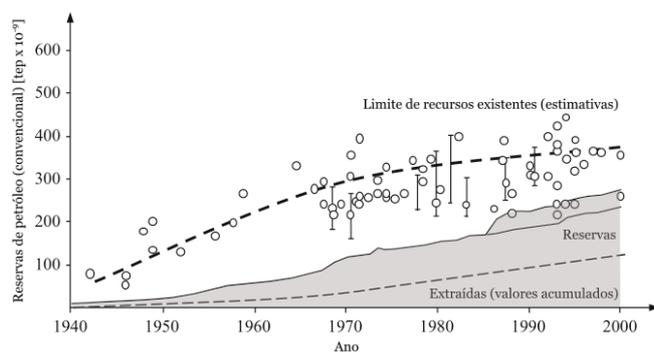


Figura 7.3: Evolução no tempo da descoberta de novas reservas de petróleo “convencional” [in Zweifel et al., 2017, p.115].

Para se compreender como o esgotar dos recursos naturais afeta a economia, nas infografias da Figura 7.4 comparam-se, qualitativamente, a desagregação da energia usada em 1950 e em 2050 para a obtenção de combustíveis fósseis. Note-se nesta figura os elevados investimentos necessários para suprir o cada vez maior apetite por energia da sociedade dos anos 2050.

Sabendo-se que, com o esgotar dos recursos se torna cada vez mais onerosa a prospeção petrolífera, no limite, chega-se à situação de a quantidade de riqueza produzida a partir no consumo de energia de origem fóssil ser maioritariamente usada na obtenção dessa mesma energia³⁴. Este é um processo termodinamicamente e economicamente insustentável. E, repare-se como nesta exposição nos abstivemos de abordar a perspetiva ambiental; associada à emissão de gases com efeito de estufa resultado de processos de

³⁴O método dos quadros de fluxos económicos na secção 5.2 faz corresponder o efeito retratado nas infografias da Figura 7.4 a um aumento contínuo dos coeficientes da matriz tecnológica.

combustão.

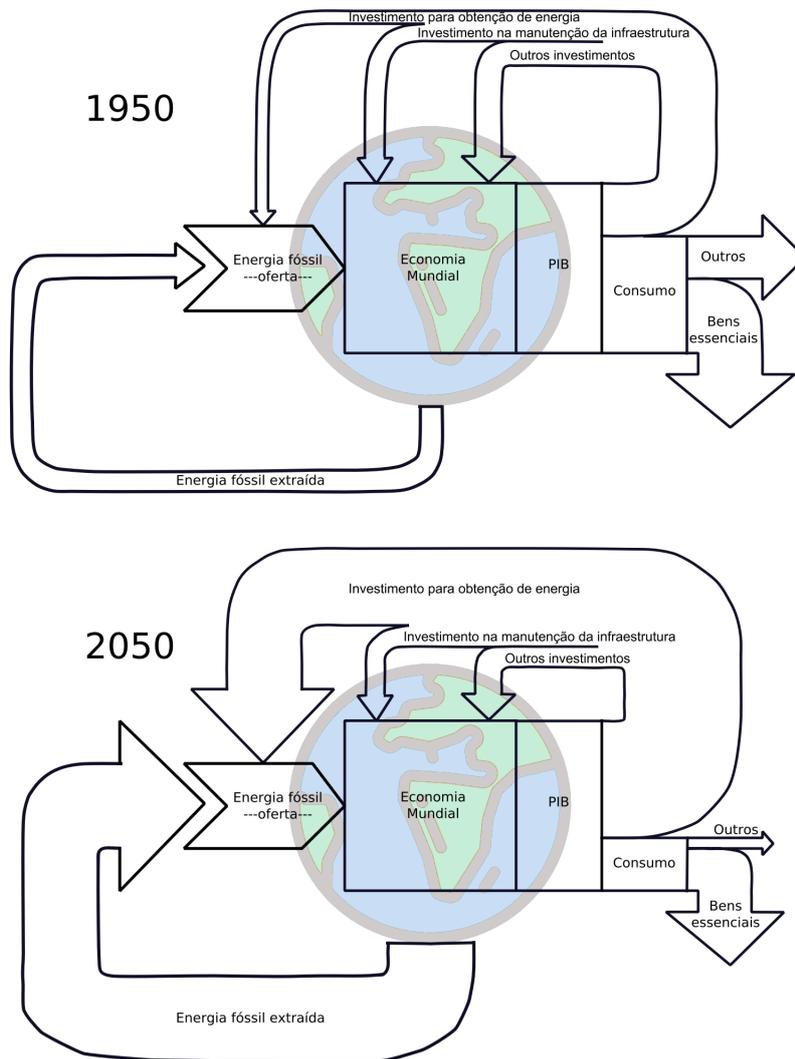


Figura 7.4: Comparação qualitativa do esforço necessário realizar em 1950 e em 2050 para manter a economia dependente de combustíveis fósseis [in Hall and Klitgaard, 2018, p.415].

A análise das figuras e dados apresentados não nos pode deixar indiferentes. Recuperando os argumentos de Hall and Klitgaard [2018], que propõem a estabilização do crescimento, importa interrogarmo-nos sobre o significado desta “estabilização”. Significa que as gerações futuras estão condenadas à austeridade? Ao empobrecimento num mundo sobrepovoado e sem recursos suficientes?

Na Figura 7.5 apresenta-se o indicador de felicidade—satisfação com a vida—em diferentes países, *versus* a riqueza *per capita* desse país [Inglehart, Klingemann *et al.*, in Hall and Klitgaard, 2018, p.497]. Os investigadores responsáveis pela obtenção da figura concluíram que, acima de um rendimento mínimo, não existe correlação entre riqueza e felicidade. Repare-se como na Figura 7.5 se tem satisfação elevada no Brasil, maior do que na Rússia ou Coreia

do Sul, apesar de um menor PIB *per capita*.

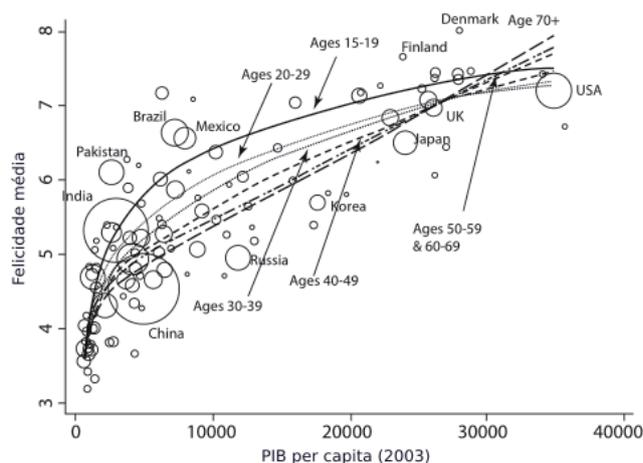


Figura 7.5: Indicador de satisfação *versus* PIB *per capita* de diferentes países [in Hall and Klitgaard, 2018, p.497].

Sendo impossível prosseguir a espiral de crescimento torna-se essencial substituir o consumo pelo assegurar do acesso a serviços essenciais (e.g., saúde, educação) de qualidade; pela realização profissional e pessoal, mas sem que tal signifique acumulação de bens materiais³⁵.

De acordo com Hall and Klitgaard é fundamental uma distribuição mais justa da riqueza e, medidas dirigidas a cada um de nós (e especialmente aos mais novos) como sejam: a tomada de consciência da importância da energia intrínseca dos materiais (atendendo ao seu ciclo de vida); a rotulagem energética dos produtos tendo em conta o seu ciclo de vida; a recuperação da dignidade e valor do trabalho; o ajustar das expectativas.

³⁵Ver o conceito de decrescimento/ *dé-croissance*, <https://fr.wikipedia.org/wiki/Décroissance>

Lista de símbolos

Alfabeto latino

A	área, m ² ; fluxo de caixa anual, EUR/ano
C	capital, EUR
C_R	fator de recuperação de capital, anos ⁻¹
c	calor específico, J/kg/K
c_p	calor específico a pressão constante, J/kg/K
c_v	calor específico a volume constante, J/kg/K
D	diâmetro, m
D_v	despesas anuais, EUR
E	energia, J
ER	energia e recursos
e	energia específica, J/kg; coeficiente de elasticidade
g	aceleração da gravidade, 9,807 m/s ²
H	entalpia, J
h	altura, m; entalpia específica, J/kg; taxa de inflação
I	irreversibilidade, J
IA	impacte ambiental
IE	intensidade energética
i	corrente elétrica, A; taxa de juro nominal
i_c	custo anual, EUR/ano
j	perda de carga linear, Pa/m
l	deslocamento, m
MS	mercadoreias e serviços
m	massa, kg
\dot{m}	caudal mássico, kg/s
P	população; pressão, Pa
P_0	pressão atmosférica, Pa
p_E	preço da energia, EUR/kWh
PCI	poder calorífico inferior
PIB	produto interno bruto, EUR
Q	Calor, J
\dot{Q}	potência calorífica, W
R	constante de um gás, J/kg/K; limite de rendibilidade (ou período de amortização), anos
r	taxa de juro real; fator de crescimento exponencial
S	entropia, J/K
s	entropia específica, J/K/kg
t	tempo, s
T	temperatura, K ou °C; duração de investimento, anos

TIR	taxa interna de rendibilidade
U	energia interna, J
u	energia interna específica, J/kg
V	volume, m ³
\dot{V}	caudal volúmico, m ³ /s
v	velocidade, m/s
W	trabalho, J
\dot{W}	potência (mecânica, elétrica, etc.), W
X	exergia, J
x	exergia específica, J/kg
z	altura, m

Alfabeto grego

Δ	gradiente
η	rendimento
η_I	rendimento energético (1ª lei termod.)
η_{II}	rendimento exergético (2ª lei termod.)
θ	energia total específica num sistema fechado, J/kg
ν	volume específico, m ³ /kg; fator de operação nominal de central termoelétrica
ρ	massa específica, kg/m ³
τ	constante de tempo, s
ϕ	potencial elétrico, V; exergia específica de um sistema fechado, J/kg
χ	diferença de temperatura adimensional; parâmetro de análise financeira
ψ	exergia específica de escoamento, J/kg
$\omega = mg$	peso, N

Acrónimos e siglas

ACV	análise de ciclo de vida
ADENE	agência [portuguesa] de energia
AT	autoridade tributária e aduaneira
bbl	[unidade] barril de crude
CAE	consumo acumulado de energia, J
CECA	Comunidade europeia do carvão e do aço
CEE	comunidade económica europeia
CIE	consumidores intensivos de energia
COP	coeficiente de desempenho
DGEG	direção geral de energia e Geologia
DL	decreto-lei
EURATOM	comunidade europeia de energia atómica
GEE	gases com efeito de estufa
IUC	imposto único de circulação
ISV	imposto sobre veículos
IMI	imposto municipal sobre imóveis
kgpep	[unidade] quilograma equivalente de petróleo
PNAC	programa nacional para as alterações climáticas
PNAEE	plano nacional de ação para a eficiência energética
RGCE	regulamento de gestão dos consumos de energia
RCM	resolução do conselho de ministros

SGCIE	sistema de gestão dos consumidores intensivos de energia
SIURE	sistema de incentivos à utilização racional de energia
tec	[unidade] tonelada equivalente de carvão
tep	[unidade] tonelada equivalente de petróleo
UE	União Europeia
URE	utilização racional de energia
VAL	valor atualizado líquido

Índices superiores e inferiores

0	de referência ou inicial
1	inicial
2	final
bc	bomba de calor
C	frio ou fonte fria
c	cinético
d	desmantelamento
e	elétrico; que entra
eq	equilíbrio financeiro
forn	fornecido
frig	ciclo frigorífico
front	fronteira
H	quente ou fonte quente
liq	líquido
p	potencial; produção
recup	recuperado
rev	reversível
s	que sai
sist	sistema
T	operação de transposição
tec	tecnológico
u	utilização

Outros

< negrito >	vetor ou matriz
$\overline{(\)}$	[barra] valor médio
$\hat{(\)}$	[acento circunflexo] valor estimado
$\dot{(\)}$	[ponto] derivada em ordem ao tempo

Bibliografia

- J. Anderies, M. Janssen, and E. Schlager. Institutions and the performance of coupled infrastructure systems. *International Journal of the Commons*, 10(2):495–516, 2016. DOI: 10.18352/ijc.651. URL <https://www.thecommonsjournal.org/article/10.18352/ijc.651/>.
- A. Bejan. *Entropy generation through heat and fluid flow*. John Wiley & Sons, 1982. ISBN 0-471-09438-2.
- M. Cavique-Santos. *Redes de Fluidos: Folhas teóricas de apoio à cadeira (versão 1.3)*. Edição de autor para ESTSetubal-IPS, 2012.
- A. Christofolletti. *Modelagem de sistemas ambientais*. Edgard Blücher, 1999.
- R. Glanville. A (cybernetic) musing: Wicked problems. *Cybernetics & Human Knowing*, 12:163–173, 2012.
- J. Griffin. Energy input-output modelling: Problems and Prospects (1976, Final Report EPRI EA-298, Prepared for Center for Energy Systems, General Electric Company, Washington; Acedido a 16 de maio de 2022), 1976. URL <https://www.osti.gov/servlets/purl/7314063>.
- C. Hall and K. Klitgaard. *Energy and the wealth of nations: An introduction to biophysical economics*. Springer, 2nd edition, 2018.
- G. Hardin. The tragedy of the commons. *Science*, 162(3859):1243–1248, 1968.
- B. Havér. Simple LCA (Acedido a 16 de maio de 2022), 2001. URL https://ec.europa.eu/environment/archives/emas/toolkit/downloads/5_1_lca.pdf.
- W. Hussain. The Common Good in The Stanford Encyclopedia of Philosophy (Spring 2018 Edition; Acedido a 8 de março de 2022), 2018. URL <https://plato.stanford.edu/archives/spr2018/entries/common-good/>.
- R. Kümmel. *The second law of economics: Energy, entropy, and the origins of wealth*. Springer, 2011.
- S. Lousada and et al. Modelação de sistemas de abastecimento de água. O caso da Ilha da Madeira. *Bitácora Urbano Territorial*, 29(2):–98, 2019.

- P. Madeira-Costa. *Economia da energia*: Edição de autor para ESTSetubal-IPS. Edição de autor para ESTSetubal-IPS, 2007.
- F. Matias Santos. *Reflexões de direito da energia*. ERSE, 2021. ISBN 978-989-53010-5-8.
- D. Meadows, D. Meadows, J. Randers, and E. Behrens III. *"The limits to growth: A report for The Club of Rome's project on the predicament of mankind"*. A Potomac Associates Book, 1972.
- D. Milanović and R. Dubonjić. Use of the elasticity of net present value in risk analysis of engineering investments projects. *FME Transactions*, 33(1):47–51, 2005.
- R. Miller and P. Blair. *Input-Output analysis: Foundations and extensions*. Cambridge University Press, 2nd edition, 2009.
- E. Ostrom, R. Gardner, and J. Walker. *Rules, games, and common-pool resources*. The University of Michigan Press, 1994.
- R. Ramos and I. Gomes. *Direito da Eficiência Energética*. Editado por Tavares da Silva, S., chapter A eficiência energética no contexto da união da energia, pages 25–54. Instituto Jurídico, Faculdade de Direito da Universidade de Coimbra, 2017. ISBN 978-989-8787-93-4.
- S. Rocha Campos. WikiGlaw, Dicionário Jurídico: Sistema de Gestão dos Consumos Intensivos de Energia—SGCIE (Acedido a 21 de fevereiro de 2022), 2016. URL https://wikiglaw.fd.uc.pt/mediawiki/index.php/Sistemas_de_Gest%C3%A3o_dos_Consumos_Intensivos_de_Energia_%E2%80%93_SGCIE.
- B. Sampaio. *Execução de auditorias de energia*. Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2019.
- M. Santos. *Direito da Eficiência Energética*. Editado por Tavares da Silva, S., chapter Os instrumentos normativos europeus da eficiência energética: Em particular a Diretiva Europeia sobre eficiência energética, pages 55–95. Instituto Jurídico, Faculdade de Direito da Universidade de Coimbra, 2017. ISBN 978-989-8787-93-4.
- M. Serres. *O contrato natural*. Instituto Piaget, 1994. ISBN 972-9295-77-8.
- S. Tavares da Silva. *Direito da Eficiência Energética*. Editado por Tavares da Silva, S., chapter Os princípios jurídicos do direito da eficiência energética, pages 143–169. Instituto Jurídico, Faculdade de Direito da Universidade de Coimbra, 2017. ISBN 978-989-8787-93-4.
- G. Wall. Exergy—A useful concept within resource accounting (1977, Report no.77-42, Institute of Theoretical Physics,

Chalmers University of Technology and University of Göteborg, Sweden; Acedido a 16 de maio de 2022), 1977. URL <http://www.exergy.se/ftp/thesis.pdf>.

P. Zweifel, A. Praktiknjo, and G. Erdmann. *Energy economics: Theory and applications*. Springer, 2017.

Y. Çengel and M. Boles. *Termodinâmica*. McGraw-Hill, 3rd edition, 2001. ISBN 972-773-097-3.

