Exercícios e simulações — Veículos Elétricos e Híbridos

Módulo 3 — ADAS, Conectividade e Arquiteturas VE/VH

Material preparatório de 21/11/2026 (horário de Brasília), versão 1.0.0. 300 exercícios em 10 disciplinas, com resolução passo a passo.

Material preparatório, não oficial. Estes exercícios foram elaborados para estudo, com fórmulas usuais de cada tema. Não substituem ementas, listas ou avaliações de um curso. Os números são realistas, mas ilustrativos.

O simulador interativo (controles e gráfico) está no site, junto de cada enunciado do Módulo 1: https://www.wilsontecnologia.com/simulacoes-veiculos-eletricos

Disciplinas neste PDF

1. Estado da arte dos VE/VH (8 h) — 30 exercícios
2. Segurança em Sistemas de Alta Tensão (8 h) — 30 exercícios
3. Máquinas Elétricas para VE/VH (20 h) — 30 exercícios
4. Baterias de VE/VH (20 h) — 30 exercícios
5. Recarga e Infraestrutura de Recarga (16 h) — 30 exercícios
6. Redes Veiculares e ADAS (12 h) — 30 exercícios
7. Ensaios Dinamométricos (8 h) — 30 exercícios
8. Modelagem de Veículos Elétricos (12 h) — 30 exercícios
9. Eletrônica de Potência (20 h) — 30 exercícios
10. Testes e Homologação de VE/VH (8 h) — 30 exercícios

Cada exercício traz enunciado, conceito, fórmula, origem, passos, resposta, interpretação e um erro comum a evitar. Tente resolver antes de ler a resolução.

Estado da arte dos VE/VH (8 h)

12.1. BEV, HEV, PHEV e FCEV (Básico)

Enunciado. Classifique, em uma frase cada, as arquiteturas BEV, HEV, PHEV e FCEV quanto à fonte de energia e à possibilidade de recarga na tomada.

Conceito. A classificação usual combina a fonte de energia que chega às rodas com a possibilidade de reabastecer essa fonte na tomada. Os nomes seguem essa lógica, e não o tamanho do motor ou da bateria.

Fórmula. `fonte de energia e recarga na tomada (sim ou não)`

De onde vem. É a definição operacional usada na literatura e na divulgação técnica para separar as quatro famílias.

Resolução

1. **BEV.** Battery Electric Vehicle: só bateria, recarrega na rede. Não há motor a combustão.
2. **HEV e PHEV.** HEV: híbrido com motor a combustão e máquina elétrica, sem plug. PHEV: híbrido com plug e autonomia elétrica útil, além do tanque.
3. **FCEV.** Fuel Cell Electric Vehicle: hidrogênio e célula a combustível alimentam o motor elétrico; a recarga é no hidrogênio, não na tomada.

Resposta. BEV: só bateria, toma da rede. HEV: híbrido sem plug. PHEV: híbrido com plug e autonomia elétrica útil. FCEV: hidrogênio e célula a combustível.

Interpretação. O que muda de uma família para a outra é a origem da energia e o acesso à rede, não o fato de haver um motor elétrico: HEV, PHEV e FCEV também o têm.

Erro comum a evitar. Chamar de elétrico todo carro com motor elétrico, ou tratar HEV e PHEV como equivalentes.

12.2. Autonomia a partir do consumo (Básico)

Enunciado. Um up! elétrico de exemplo tem 32,0 kWh úteis na bateria e consome 13,0 kWh/100 km num ciclo misto. Qual é a autonomia estimada?

Conceito. A autonomia estimada é a distância que a energia útil da bateria cobre, dado um consumo médio em kWh por 100 km. Vale enquanto o consumo for representativo do uso.

Fórmula. $A = (100\ E_{útil})/(c)$

De onde vem. Vem da definição de consumo c = energia / distância, isolando a distância. O fator 100 aparece porque c está em kWh/100 km.

Resolução

1. **Organizar os dados.** E_útil = 32,0 kWh e c = 13,0 kWh/100 km.
2. **Aplicar a regra de três.** A = 100 × 32,0 / 13,0 = 246,2 km, que se declara 246 km.

Resposta. 246 km.

Interpretação. Com este consumo de exemplo, os 32,0 kWh úteis cobrem cerca de 246 km. Se o consumo subir (frio, morro, velocidade), a autonomia cai na mesma proporção.

Erro comum a evitar. Usar a energia bruta do pacote no lugar da útil, ou misturar kWh/km com kWh/100 km sem o fator 100.

12.3. Do tanque (ou da bateria) até a roda (Básico)

Enunciado. A 100 km/h constantes, o up! precisa de 11,76 kWh nas rodas para rodar 100 km (exercício 1.1). Compare a energia de combustível de um ICE com rendimento tanque-roda de 22 % e a energia da bateria de um BEV com rendimento bateria-roda de 80 % (valores de exemplo). Use 8,9 kWh/L para a gasolina.

Conceito. A energia nas rodas é a mesma nos dois casos; o que muda é o rendimento da cadeia. No ICE, a maior parte da energia do combustível vira calor. No BEV, a cadeia é bem mais eficiente.

Fórmula. $E_{fonte} = (E_{roda})/(\eta)$

De onde vem. É a definição de rendimento η = E_roda / E_fonte, isolando a energia retirada do tanque ou da bateria. A conversão para litros usa o PCI aproximado da gasolina, 8,9 kWh/L.

Resolução

1. **Energia do ICE.** E_ICE = 11,76 / 0,22 = 53,5 kWh/100 km, ou 53,5 / 8,9 = 6,0 L/100 km.
2. **Energia do BEV.** E_BEV = 11,76 / 0,80 = 14,7 kWh/100 km na bateria.

Resposta. ICE: 53,5 kWh/100 km, ou 6,0 L/100 km. BEV: 14,7 kWh/100 km na bateria.

Interpretação. Para a mesma tarefa nas rodas, o ICE pede cerca de 3,6 vezes mais energia na fonte do que o BEV neste exemplo (53,5 / 14,7). Isso ainda não inclui a geração da eletricidade nem o refino do combustível.

Erro comum a evitar. Aplicar o rendimento no sentido invertido (multiplicar em vez de dividir) ou usar 11,76 kWh como se já fosse consumo de bateria ou de tanque.

12.4. Energia armazenada no tanque (Básico)

Enunciado. O tanque de exemplo do up! leva 35 L de gasolina. Com 8,9 kWh/L, quanta energia química há no tanque cheio? Compare com os 32,0 kWh úteis da bateria ilustrativa.

Conceito. O volume do tanque vira energia quando se multiplica pelo poder calorífico. Essa energia ainda não é trabalho nas rodas: o rendimento tanque-roda é que vai dizer quanto se aproveita.

Fórmula. `E_tanque = V_tanque × PCI`

De onde vem. É a definição do poder calorífico inferior (PCI): energia liberada por litro. O valor 8,9 kWh/L é um arredondamento usual para gasolina.

Resolução

1. **Energia no tanque.** E = 35 × 8,9 = 311,5 kWh.
2. **Comparar com a bateria.** 311,5 / 32,0 = 9,73. O tanque guarda cerca de 9,7 vezes mais energia do que a bateria útil de exemplo.

Resposta. 311,5 kWh no tanque, cerca de 9,7 vezes a bateria de 32,0 kWh.

Interpretação. O combustível é muito mais denso em energia do que o pacote atual; por isso um tanque pequeno ainda dá mais autonomia do que uma bateria de dezenas de kWh, apesar do rendimento menor do ICE.

Erro comum a evitar. Comparar litros com kWh sem o PCI, ou já descontar o rendimento tanque-roda quando o enunciado pede só a energia armazenada.

12.5. Autonomia com tanque cheio e com bateria cheia (Básico)

Enunciado. Com o consumo do exercício 12.3 (6,0 L/100 km no ICE e 14,7 kWh/100 km no BEV), qual é a autonomia de um tanque de 35 L e de uma bateria útil de 32,0 kWh, ambos a 100 km/h constantes no plano?

Conceito. A autonomia é outra vez a regra de três, agora com os consumos já reduzidos à fonte na condição de 100 km/h do exercício 12.3, diferente do ciclo misto de 13,0 kWh/100 km do exercício 12.2.

Fórmula. `A = (100 Q)/(c)`

De onde vem. Mesma definição de consumo do exercício 12.2, com Q em litros ou em kWh e c nas unidades correspondentes.

Resolução

1. **ICE.** A_ICE = 100 × 35 / 6,0 = 583 km.
2. **BEV.** A_BEV = 100 × 32,0 / 14,7 = 218 km.

Resposta. ICE: 583 km. BEV: 218 km, nesta condição de 100 km/h.

Interpretação. A 100 km/h constantes, o tanque ainda leva o carro mais longe, porque a energia armazenada é muito maior, mesmo com rendimento pior. No ciclo misto do exercício 12.2 o BEV tinha 246 km, com consumo menor do que a 100 km/h.

Erro comum a evitar. Misturar o consumo misto de 13,0 kWh/100 km com a condição de 100 km/h (14,7 kWh/100 km), ou esquecer o fator 100.

12.6. Grau de hibridização (Básico)

Enunciado. Um híbrido de exemplo tem um motor a combustão de 55 kW e uma máquina elétrica de 15 kW (potências máximas). Qual é o grau de hibridização? Esse valor é típico de um micro, mild ou full hybrid, na classificação ilustrativa em que micro fica abaixo de 10 %, mild vai até cerca de 25 % e full está acima disso?

Conceito. O grau de hibridização compara a potência da máquina elétrica com a potência total instalada. Ele não conta a bateria nem diz se há plug, mas ajuda a situar o projeto entre micro, mild e full hybrid.

Fórmula. `H = (P_el)/(P_el + P_ICE)`

De onde vem. É a definição usual de degree of hybridization: fração da potência elétrica sobre a potência combinada das duas máquinas.

Resolução

1. **Somar as potências.** P_total = 15 + 55 = 70 kW.
2. **Calcular H e classificar.** H = 15 / 70 = 0,214 = 21,4 %. Está na faixa ilustrativa de mild hybrid (cerca de 10 % a 25 %).

Resposta. H = 0,214 (21,4 %), típico de mild hybrid nesta classificação ilustrativa.

Interpretação. Com 21,4 %, a máquina elétrica já ajuda de forma relevante, mas o motor a combustão continua sendo a fonte principal de potência.

Erro comum a evitar. Dividir pela potência só do ICE, ou tratar H como se já dissesse se o carro tem ou não tomada.

12.7. Massa do pacote a partir da densidade de energia (Básico)

Enunciado. A bateria útil de exemplo é 32,0 kWh e o pacote completo tem densidade de 150 Wh/kg (valor ilustrativo, já incluindo módulos, caixa e gestão térmica). Qual é a massa do pacote? Que fração ela representa dos 900 kg do up!?.

Conceito. A densidade de energia do pacote (não da célula solta) liga a energia instalada à massa que o veículo precisa carregar. Essa massa entra na dinâmica, no consumo e no projeto do eixo.

Fórmula. `m_pacote = (E)/(e_esp)`

De onde vem. É a definição de energia específica: e_esp = E / m. Cuidado com as unidades: 150 Wh/kg = 0,150 kWh/kg.

Resolução

1. **Converter a densidade.** 150 Wh/kg = 0,150 kWh/kg.
2. **Massa do pacote.** m = 32,0 / 0,150 = 213 kg.
3. **Fração da massa do carro.** 213 / 900 = 23,7 % da ordem de marcha de exemplo.

Resposta. m_pacote = 213 kg, cerca de 23,7 % dos 900 kg.

Interpretação. Um pacote de 213 kg é uma fração importante do up!. Por isso a densidade de energia do pacote, e não só a da célula, é um dado de projeto.

Erro comum a evitar. Usar 150 kWh/kg no lugar de 150 Wh/kg, o que daria uma massa absurda de gramas.

12.8. Efeito da massa extra no consumo a 100 km/h (Básico)

Enunciado. Com a massa de pacote do exercício 12.7 (213 kg) e C_r = 0,012, quanto aumenta a força de rolamento? Qual é o acréscimo de energia nas rodas em 100 km, no plano e a velocidade constante?

Conceito. Em velocidade constante no plano, a massa extra aparece sobretudo no rolamento (e na inércia, se houver aceleração). O arrasto aerodinâmico não depende da massa. O acréscimo de força é Δm g C_r, e a energia é força vezes distância.

Fórmula. $\Delta E = \Delta m\, g\, C_r\, s$

De onde vem. A força de rolamento é F_r = m g C_r. A variação com a massa é linear. A energia em um percurso s é F s; com s = 100 km = 100 000 m, o resultado em kWh pede divisão por $3{,}6\times10^{6}$ J/kWh.

Resolução

1. **Força extra.** $\Delta F = 213 \times 9{,}81 \times 0{,}012 = 25{,}1$ N.
2. **Energia em 100 km.** $\Delta E = 25{,}1 \times 100\,000 / 3{,}6\times10^{6} = 0{,}70$ kWh/100 km nas rodas.

Resposta. ΔF = 25,1 N; ΔE = 0,70 kWh/100 km nas rodas.

Interpretação. O efeito só do rolamento é de menos de 1 kWh/100 km, pequeno diante dos 11,76 kWh nas rodas a 100 km/h. Em cidade, com muita aceleração, a inércia da massa extra pesa mais do que neste cálculo de velocidade constante.

Erro comum a evitar. Somar a massa extra também no termo aerodinâmico, ou esquecer de converter joules para kWh.

12.9. CO2 de uso: rede elétrica versus gasolina (Básico)

Enunciado. No ciclo misto de 13,0 kWh/100 km, adote uma intensidade ilustrativa da rede de 80 g CO2/kWh. No ICE, use 6,0 L/100 km e 2,3 kg CO2 por litro de gasolina. Qual é a emissão de uso, em g/km, nos dois casos?

Conceito. A emissão de uso (tank-to-wheel ou, no BEV, da eletricidade consumida) é o produto do consumo pela intensidade de carbono do energético. Não inclui ainda fabricar a bateria nem refinar o petróleo, mas já mostra a ordem de grandeza quando a rede é relativamente limpa.

Fórmula. $e = c \times f$

De onde vem. É um balanço de carbono: cada kWh da rede e cada litro de gasolina carregam um fator f. Para chegar a g/km, converta o consumo de 100 km para 1 km.

Resolução

1. **BEV.** e_BEV = 13,0 kWh/100 km × 80 g/kWh = 1 040 g/100 km = 10,4 g/km.
2. **ICE.** e_ICE = 6,0 L/100 km × 2,3 kg/L = 13,8 kg/100 km = 138 g/km.

Resposta. BEV: 10,4 g/km. ICE: 138 g/km, só no uso, com os fatores deste exemplo.

Interpretação. Com 80 g/kWh, o BEV emite cerca de treze vezes menos CO2 de uso do que o ICE neste exemplo. Se a rede for bem mais suja, a vantagem cai; se for mais limpa, aumenta. Falta ainda o carbono da fabricação da bateria, visto no exercício 12.26.

Erro comum a evitar. Deixar o resultado em g/100 km e comparar com g/km, ou usar 2,3 g/L no lugar de 2,3 kg/L.

12.10. Densidade gravimétrica: gasolina versus pacote (Básico)

Enunciado. A gasolina tem cerca de 8,9 kWh/L e densidade 0,75 kg/L. O pacote do exercício 12.7 tem 150 Wh/kg. Quantas vezes a gasolina é mais densa em energia, por quilograma, do que o pacote?

Conceito. A densidade gravimétrica diz quanta energia cabe por unidade de massa. Combustíveis líquidos levam uma enorme vantagem sobre pacotes de íon-lítio atuais; o rendimento do trem de força é que parcialmente compensa isso no uso.

Fórmula. `e = (PCI)/(ρ)`

De onde vem. Energia por quilograma = energia por litro dividida pela massa por litro. A comparação com o pacote pede as duas grandezas na mesma unidade, por exemplo Wh/kg.

Resolução

1. **Gasolina.** e_gas = 8,9 / 0,75 = 11,87 kWh/kg = 11 867 Wh/kg.
2. **Relação.** 11 867 / 150 = 79 vezes.

Resposta. A gasolina tem 11 867 Wh/kg, cerca de 79 vezes a densidade de 150 Wh/kg do pacote.

Interpretação. A diferença de duas ordens de grandeza explica por que o tanque é leve e a bateria é uma peça estrutural. O BEV ainda pode gastar menos energia na fonte, como no exercício 12.3, porque o rendimento da cadeia é maior.

Erro comum a evitar. Comparar kWh/L com Wh/kg sem passar pela densidade da gasolina, ou usar a densidade da célula no lugar da do pacote.

12.11. Autonomia de um PHEV (elétrica e total) (Intermediário)

Enunciado. Um PHEV de exemplo tem 10,0 kWh úteis na bateria e um tanque de 30 L. No modo elétrico consome 14,0 kWh/100 km; no modo híbrido, 5,5 L/100 km. Qual é a autonomia elétrica e a autonomia total, supondo que se esgota primeiro a bateria e depois o tanque?

Conceito. No PHEV há duas autonomias: a elétrica, até acabar a bateria recarregável, e a do tanque, quando o motor a combustão assume. A autonomia total, neste modelo simples, é a soma das duas, se não houver recarga no caminho.

Fórmula. `A = A_el + A_tanque = 100 (E_útil)/(c_el) + 100 (V)/(c_h)`

De onde vem. É a mesma regra de três do exercício 12.2, aplicada a cada fonte, e depois somada. Vale quando os dois modos não se misturam no mesmo trecho.

Resolução

1. **Autonomia elétrica.** A_el = 100 × 10,0 / 14,0 = 71,4 km, ou 71 km.
2. **Autonomia do tanque.** A_tanque = 100 × 30 / 5,5 = 545 km.
3. **Total.** A = 71,4 + 545 = 617 km.

Resposta. Autonomia elétrica: 71 km. Autonomia total: 617 km.

Interpretação. Os 71 km elétricos cobrem o deslocamento diário de muita gente; o tanque entra como reserva. A autonomia total depende de como se dirige no modo híbrido, não só da bateria.

Erro comum a evitar. Somar kWh com litros, ou usar o consumo elétrico também no trecho a combustão.

12.12. Autonomia de um FCEV (Intermediário)

Enunciado. Um FCEV de exemplo leva 4,0 kg de hidrogênio. Use 33,3 kWh/kg como energia do H2 e rendimento tanque-roda de 50 % (célula, inversor, motor e transmissão). Com 11,76 kWh nas rodas por 100 km (exercício 1.1), qual é a autonomia a 100 km/h no plano?

Conceito. No FCEV a energia vem do hidrogênio. Multiplica-se a massa pelo poder calorífico e pelo rendimento da cadeia até a roda; a autonomia segue a mesma regra de três dos exercícios anteriores.

Fórmula. $A = 100\ (m_{H2} \times 33{,}3 \times \eta)/(E_{roda,100\ km})$

De onde vem. A energia útil que chega às rodas é m × PCI × η. A distância é essa energia dividida pela energia nas rodas por quilômetro.

Resolução

1. **Energia do tanque de H2.** E_H2 = 4,0 × 33,3 = 133,2 kWh.
2. **Energia nas rodas.** E_roda = 133,2 × 0,50 = 66,6 kWh.
3. **Autonomia.** A = 66,6 / 11,76 × 100 = 566 km.

Resposta. A = 566 km a 100 km/h no plano.

Interpretação. Com 4 kg de hidrogênio e 50 % de rendimento, a autonomia de exemplo fica na casa dos 560 km, comparável a um tanque de gasolina e maior do que a bateria de 32 kWh neste mesmo regime.

Erro comum a evitar. Usar os 33,3 kWh/kg como se já fossem energia na roda, sem o rendimento de 50 %.

12.13. Consumo de um híbrido em série a 100 km/h (Intermediário)

Enunciado. Em um híbrido em série, o motor a combustão só aciona um gerador. Adote rendimentos de exemplo 30 % no ICE, 90 % no gerador e 90 % no conjunto inversor-motor-transmissão. Com 11,76 kWh nas rodas por 100 km, qual é o consumo em kWh/100 km de combustível e em L/100 km? Use 8,9 kWh/L.

Conceito. No híbrido em série a energia passa por três elos em cadeia. O rendimento total é o produto dos três, e a energia de combustível é a energia nas rodas dividida por esse produto.

Fórmula. $E_{fuel} = (E_{roda})/(\eta_{ICE}\ \eta_{ger}\ \eta_{mot})$

De onde vem. Rendimentos em série se multiplicam, porque a saída de um elo é a entrada do seguinte. A conversão para litros usa o mesmo PCI de 8,9 kWh/L.

Resolução

1. **Rendimento da cadeia.** η = 0,30 × 0,90 × 0,90 = 0,243.
2. **Energia de combustível.** E = 11,76 / 0,243 = 48,4 kWh/100 km.
3. **Litros.** c = 48,4 / 8,9 = 5,44 L/100 km.

Resposta. 48,4 kWh/100 km, ou 5,44 L/100 km.

Interpretação. O valor é melhor do que os 6,0 L/100 km do ICE de 22 % do exercício 12.3, porque o motor pode operar perto do melhor rendimento (30 % neste exemplo). Ainda é bem maior do que os 14,7 kWh/100 km do BEV.

Erro comum a evitar. Somar os rendimentos no lugar de multiplicá-los, ou esquecer um dos dois elos elétricos.

12.14. Custo de energia por 100 km (Intermediário)

Enunciado. Com os consumos do exercício 12.3 (14,7 kWh/100 km no BEV e 6,0 L/100 km no ICE), calcule o custo por 100 km. Use as tarifas ilustrativas de R$ 0,80 / kWh e R$ 6,00 / L.

Conceito. O custo de uso é o produto do consumo pelo preço do energético. É um número de operação, não inclui a compra do carro nem a manutenção, mas já permite comparar o gasto do quilômetro.

Fórmula. `C = c × p`

De onde vem. É a definição de custo: quantidade consumida vezes preço unitário, nas mesmas unidades (kWh ou litro) por 100 km.

Resolução

1. **BEV.** C_BEV = 14,7 × 0,80 = 11,76 R$/100 km.
2. **ICE.** C_ICE = 6,0 × 6,00 = 36,00 R$/100 km.

Resposta. BEV: R$ 11,76 / 100 km. ICE: R$ 36,00 / 100 km, com as tarifas deste exemplo.

Interpretação. Neste exemplo o quilômetro elétrico sai cerca de três vezes mais barato no energético. O resultado muda se a tarifa, o ciclo ou o preço do litro mudarem; a simulação deixa variar esses dados.

Erro comum a evitar. Comparar R$/kWh com R$/L sem passar pelo consumo, ou usar o PCI para transformar o preço sem necessidade.

12.15. Energia well-to-wheel ilustrativa (Intermediário)

Enunciado. Retome 14,7 kWh/100 km na bateria e 53,5 kWh/100 km no tanque do exercício 12.3. Se o carregador e a rede até a bateria têm rendimento conjunto de 90 %, qual é a energia retirada da rede? Se o caminho poço-tanque acrescenta 20 % à energia do combustível, qual é a energia well-to-wheel do ICE?

Conceito. A comparação justa entre BEV e ICE olha a energia desde a fonte primária, ou pelo menos desde a rede e o poço, não só desde a bateria e o tanque. Aqui usamos dois fatores ilustrativos, um para cada cadeia.

Fórmula. `E_rede = (E_bat)/(η_chg); E_WTW,ICE = E_tanque (1 + f_WTT)`

De onde vem. No BEV, o rendimento do carregador (e das perdas até a bateria) aumenta a energia pedida à rede. No ICE, o fator poço-tanque multiplica a energia já calculada no tanque.

Resolução

1. **Energia na rede.** E_rede = 14,7 / 0,90 = 16,3 kWh/100 km.
2. **ICE well-to-wheel.** E_WTW = 53,5 × 1,20 = 64,2 kWh/100 km.

Resposta. Rede (BEV): 16,3 kWh/100 km. ICE well-to-wheel: 64,2 kWh/100 km.

Interpretação. Mesmo incluindo o carregador, a cadeia elétrica pede bem menos energia do que o ICE com o acréscimo poço-tanque, neste exemplo. Uma comparação completa ainda poderia incluir o rendimento das usinas, que depende da matriz.

Erro comum a evitar. Aplicar os 20 % também no BEV, ou multiplicar a bateria por 0,90 no lugar de dividir.

12.16. Acessórios e autonomia a 100 km/h (Intermediário)

Enunciado. Além dos 14,7 kWh/100 km na bateria do exercício 12.3, o climatizador e os acessórios pedem 1,0 kW constantes. A 100 km/h no plano, qual é o novo consumo e a nova autonomia com 32,0 kWh úteis?

Conceito. A 100 km/h, 1,0 kW de acessórios é 1,0 kWh a cada 100 km. Esse termo se soma ao consumo de tração e reduz a autonomia na proporção do novo consumo.

Fórmula. `c_tot = c_tração + (100 P_acess)/(v)`

De onde vem. Potência vezes tempo é energia. Em 100 km a 100 km/h o tempo é 1,0 h, então 1,0 kW acrescenta 1,0 kWh/100 km. Em geral o acréscimo é 100 P / v, com v em km/h e P em kW.

Resolução

1. **Novo consumo.** c = 14,7 + 1,0 = 15,7 kWh/100 km.
2. **Autonomias.** Sem acessórios, A = 100 × 32,0 / 14,7 = 218 km. Com acessórios, A = 100 × 32,0 / 15,7 = 204 km, uma perda de 14 km.

Resposta. Consumo 15,7 kWh/100 km; autonomia 204 km (eram 218 km).

Interpretação. Um quilowatt de clima a 100 km/h custa cerca de 14 km de autonomia neste exemplo. Em cidade, com velocidade média menor, o mesmo kW pesa ainda mais, porque o tempo para rodar 100 km aumenta.

Erro comum a evitar. Somar 1,0 kW ao consumo em kWh/100 km sem perceber que a equivalência 1 kW = 1 kWh/100 km só vale a 100 km/h.

12.17. Potência média num ciclo de 100 km (Intermediário)

Enunciado. Num ciclo misto de 100 km, a energia nas rodas é 14,0 kWh e o tempo de viagem é 1,5 h (dados de exemplo). Qual é a potência média nas rodas?

Conceito. A potência média é a energia dividida pelo tempo. Ela é bem menor do que a potência de pico do motor, e é o número que liga o ciclo ao dimensionamento térmico da cadeia.

Fórmula. `P_méd = (E)/(t)`

De onde vem. É a definição de potência média. Com E em kWh e t em horas, P sai em kW, sem fator extra.

Resolução

1. **Unidades.** 14,0 kWh em 1,5 h já estão em unidades compatíveis.
2. **Dividir.** P = 14,0 / 1,5 = 9,33 kW.

Resposta. P_méd = 9,33 kW nas rodas.

Interpretação. Cerca de 9 kW médios bastam para este ciclo do up!, enquanto o motor de exemplo nas disciplinas seguintes tem 80 kW de pico. O pico cobre subidas e acelerações; o consumo depende muito mais desta média.

Erro comum a evitar. Usar 14,0 kWh como se já fossem kW, ou converter 1,5 h para 90 min e esquecer de ajustar a unidade da energia.

12.18. Cruzeiro elétrico num híbrido power-split (Intermediário)

Enunciado. Um híbrido de exemplo tem 25 kW na máquina elétrica e 60 kW no ICE. A 100 km/h no plano o up! pede 11,76 kW nas rodas (exercício 1.1). O cruzeiro pode ser só elétrico, do ponto de vista de potência? Qual é o grau de hibridização?

Conceito. Se a potência elétrica disponível é maior do que a potência de cruzeiro, o ICE pode ficar desligado nesse regime, desde que a bateria suporte a energia. O grau de hibridização H do exercício 12.6 completa o retrato do projeto.

Fórmula. `H = (P_el)/(P_el + P_ICE)`

De onde vem. Compara-se potência com potência, na mesma unidade. H é a definição já usada no exercício 12.6.

Resolução

1. **Comparar potências.** 11,76 kW cabe nos 25 kW elétricos, então o cruzeiro no plano pode ser só elétrico.
2. **Grau de hibridização.** H = 25 / (25 + 60) = 0,294 = 29,4 %, já na faixa ilustrativa de full hybrid (acima de 25 %).

Resposta. Sim, o cruzeiro de 11,76 kW cabe nos 25 kW elétricos. H = 29,4 % (full hybrid, nesta classificação).

Interpretação. Potência instantânea não é energia: o cruzeiro elétrico só se sustenta enquanto houver carga na bateria. Em um HEV sem plug, essa carga é pequena, então o ICE logo volta a trabalhar para gerar.

Erro comum a evitar. Comparar 25 kW com 11,76 kWh, misturando potência e energia, ou concluir que H alto garante autonomia elétrica longa.

12.19. Recuperação típica de um mild hybrid 48 V (Intermediário)

Enunciado. Um mild hybrid 48 V recupera, em cada parada a partir de 50 km/h, 65 % da energia cinética do up! de 900 kg (valor de exemplo, já incluindo limites da máquina e da bateria pequena). Quanto volta para a bateria por parada? E em 300 paradas iguais?

Conceito. A energia cinética é ½ m v². O rendimento roda-bateria, bem menor do que no cruzeiro, diz a fração que de fato entra na bateria de 48 V. Multiplicar pelo número de paradas dá o ganho do ciclo urbano.

Fórmula. `E = η × ½ m v²`

De onde vem. A energia cinética sai da mecânica newtoniana. O fator η é um rendimento global de exemplo da cadeia de recuperação, não só do inversor.

Resolução

1. **Velocidade e energia cinética.** v = 50 / 3,6 = 13,89 m/s. $E_c = 0,5 \times 900 \times (13,89)^2 = 86,8$ kJ = 0,0241 kWh.
2. **Por parada e em 300 paradas.** E = 0,65 × 0,0241 = 0,0157 kWh. Em 300 paradas: 300 × 0,0157 = 4,70 kWh.

Resposta. 0,0157 kWh por parada a partir de 50 km/h; 4,70 kWh em 300 paradas.

Interpretação. Cerca de 4,7 kWh em 300 paradas é uma ajuda real no urbano, mas é pouca energia para uma viagem: a bateria 48 V não substitui um PHEV. O ganho cresce com o quadrado da velocidade de entrada da parada.

Erro comum a evitar. Usar v em km/h dentro de ½ m v², ou esquecer de converter joules para kWh (dividir por $3,6 \times 10^6$).

12.20. Margem de carga numa viagem de 200 km (Intermediário)

Enunciado. Com 32,0 kWh úteis e o consumo de 14,7 kWh/100 km a 100 km/h do exercício 12.3, parte-se com a bateria cheia para uma viagem de 200 km no plano, sem recarga. Qual energia é necessária, o que sobra e qual é o SOC final?

Conceito. A energia necessária é o consumo vezes a distância. A margem é a diferença até a energia útil, e o SOC final é essa margem relativa à capacidade útil, partindo de 100 %.

Fórmula. `E = c × s / 100; SOC = 100 (E_útil − E) / E_útil`

De onde vem. O consumo já está em kWh/100 km, então se divide a distância por 100. O SOC aqui é só um balanço de energia, sem perdas extras de temperatura ou acessórios.

Resolução

1. **Energia da viagem.** E = 14,7 × 200 / 100 = 29,4 kWh.
2. **Sobra e SOC.** Sobra = 32,0 − 29,4 = 2,6 kWh. SOC final = 100 × 2,6 / 32,0 = 8,1 %.

Resposta. São precisos 29,4 kWh; sobram 2,6 kWh, SOC final 8,1 %.

Interpretação. A viagem cabe, mas a margem é apertada: qualquer morro, vento ou clima pode exigir uma recarga. Este é o tipo de conta que se faz antes de um trecho rodoviário em um BEV de bateria pequena.

Erro comum a evitar. Calcular 14,7 × 200 sem dividir por 100, o que daria 2 940 kWh, ou usar a autonomia mista de 246 km no lugar do consumo a 100 km/h.

12.21. Dimensionar a bateria para o deslocamento diário (Desafio)

Enunciado. Um usuário roda 60 km por dia, com consumo de 14,7 kWh/100 km (exercício 12.3). Quer uma margem de 20 % além da energia do dia e só usa 90 % da energia nominal (DoD). Qual deve ser a energia nominal do pacote, se ele recarrega todas as noites e não viaja além disso?

Conceito. A energia do dia é o consumo vezes a distância. Depois se divide pela margem (1 − reserva) e pela profundidade de descarga, para chegar à energia nominal que o pacote precisa ter.

Fórmula. `E_nom = (c s / 100)/((1 − r) DoD)`

De onde vem. É um balanço de energia com dois fatores de projeto: a reserva de energia que não se quer usar no dia típico e a fração da capacidade que o algoritmo de carga de fato explora.

Resolução

1. **Energia do dia.** E_dia = 14,7 × 60 / 100 = 8,82 kWh.
2. **Aplicar reserva e DoD.** E_nom = 8,82 / (0,80 × 0,90) = 12,25 kWh.

Resposta. E_nom = 12,25 kWh, neste uso só urbano com recarga noturna.

Interpretação. Para o vaivém diário, uma bateria bem menor do que 32 kWh já bastaria. O pacote maior do up! elétrico de exemplo existe sobretudo para viagens e para folga, não para o dia típico.

Erro comum a evitar. Esquecer um dos dois fatores (reserva ou DoD), ou usar 14,7 kWh como energia do dia sem multiplicar pela distância.

12.22. Consumo equivalente em litros por 100 km (Desafio)

Enunciado. Transforme os 14,7 kWh/100 km na bateria do exercício 12.3 em um consumo equivalente de gasolina, usando 8,9 kWh/L. Este número é de energia, não de custo.

Conceito. Dividir a energia da bateria pelo PCI da gasolina dá o volume de combustível que conteria a mesma energia. É útil para comparar ordens de grandeza, mas não substitui o custo do exercício 12.14 nem o rendimento do ICE.

Fórmula. `c_eq = (c_bat)/(PCI)`

De onde vem. É só uma mudança de unidade de energia, com o mesmo PCI já usado nos exercícios 12.3 e 12.4.

Resolução

1. **Dividir pelo PCI.** c_eq = 14,7 / 8,9 = 1,65 L/100 km equivalentes.

Resposta. 1,65 L/100 km equivalentes, em energia.

Interpretação. O BEV gasta o equivalente energético a cerca de 1,65 L por 100 km neste regime, bem menos do que os 6,0 L/100 km do ICE, porque a comparação já está na energia da fonte da cadeia do veículo, não nas rodas.

Erro comum a evitar. Interpretar 1,65 L/100 km como consumo medido de um ICE, ou usar este número para falar de custo sem o preço da energia.

12.23. Autonomia em rampa de 5 % a 100 km/h (Desafio)

Enunciado. O up! elétrico sobe uma rampa de 5 % a 100 km/h constantes. Use m = 900 kg, g = 9,81 m/s², a aproximação sen α ≈ 0,05, 11,76 kW já nas rodas no plano (exercício 1.1) e rendimento bateria-roda de 80 %. Com 32,0 kWh úteis, qual é a autonomia nesta subida, se ela fosse contínua?

Conceito. Na rampa entra a força m g sen α, que a 100 km/h vira potência extra. Soma-se à potência do plano, divide-se pelo rendimento e obtém-se o consumo; a autonomia é a regra de três com 32,0 kWh.

Fórmula. `P_rampa = m g sen α · v, c = 100 (P_plano + P_rampa) / (η v)`

De onde vem. A componente do peso no sentido da rampa é m g sen α (aqui sen α ≈ 5/100). A potência é força vezes velocidade. O consumo em kWh/100 km é a potência na bateria vezes o tempo para rodar 100 km.

Resolução

1. **Força e potência da rampa.** F = 900 × 9,81 × 0,05 = 441 N. P_rampa = 441 × (100/3,6) = 12,26 kW.
2. **Potência e consumo na bateria.** P_roda = 11,76 + 12,26 = 24,02 kW. c = 24,02 / 0,80 = 30,03 kWh/100 km, pois 100 km a 100 km/h duram 1 h.
3. **Autonomia.** A = 100 × 32,0 / 30,03 = 107 km.

Resposta. P_rampa = 12,26 kW; consumo 30,03 kWh/100 km; autonomia 107 km.

Interpretação. A rampa contínua de 5 % mais do que dobra o consumo a 100 km/h e corta a autonomia para cerca de 107 km. Subidas longas são um dos piores casos para um BEV de bateria pequena.

Erro comum a evitar. Usar 5 % como 5°, ou esquecer de somar os 11,76 kW do plano, calculando a autonomia só com a parcela da rampa.

12.24. Climatização de 2 kW a 100 km/h (Desafio)

Enunciado. O climatizador pede 2,0 kW contínuos (frio ou aquecimento elétrico, valor de exemplo), além dos 14,7 kWh/100 km de tração a 100 km/h. Com 32,0 kWh úteis, qual é a autonomia? Quanto ela cai em relação ao caso sem clima?

Conceito. Como no exercício 12.16, a 100 km/h cada kW de acessório acrescenta 1 kWh/100 km. Com 2 kW o consumo sobe 2,0 kWh/100 km e a autonomia cai na razão inversa.

Fórmula. `c = c_tração + (100 P_clima)/(v), A = 100 E / c`

De onde vem. É o mesmo balanço de energia do exercício 12.16, agora com 2 kW, típicos de um aquecimento por resistência em manhã fria.

Resolução

1. **Consumo.** c = 14,7 + 2,0 = 16,7 kWh/100 km.
2. **Autonomia e perda.** A = 100 × 32,0 / 16,7 = 192 km, contra 218 km sem clima, uma perda de 26 km.

Resposta. Autonomia 192 km, 26 km a menos do que os 218 km sem climatização.

Interpretação. Dois quilowatts de resistência cortam cerca de 26 km neste exemplo, mais do que o rolamento da massa da bateria no exercício 12.8. Por isso bombas de calor e pré-climatização na tomada importam tanto em BEV pequenos.

Erro comum a evitar. Somar 2 kW aos 14,7 kWh/100 km em qualquer velocidade, sem o fator 100/v.

12.25. Consumo de um híbrido em série pelo BSFC (Desafio)

Enunciado. No híbrido em série do exercício 12.13, o motor opera em um ponto de 250 g/kWh (BSFC de exemplo). A cadeia gerador + inversor-motor tem rendimento 0,90 × 0,90, e a roda pede 11,76 kW a 100 km/h. A densidade da gasolina é 0,75 kg/L. Qual é o consumo em L/100 km?

Conceito. Primeiro acha-se a potência que o ICE precisa entregar ao gerador, dividindo a potência nas rodas pelos dois rendimentos elétricos. O BSFC converte essa potência em vazão mássica; a densidade transforma massa em volume. A 100 km/h, a vazão em kg/h é também kg/100 km.

Fórmula. `P_ICE = (P_roda)/(η_ger η_mot), c = (BSFC × P_ICE)/(ρ)`

De onde vem. BSFC (brake specific fuel consumption) é massa de combustível por energia mecânica no eixo do ICE. Os rendimentos elétricos estão em série, como no exercício 12.13.

Resolução

1. **Potência do ICE.** P_ICE = 11,76 / (0,90 × 0,90) = 14,52 kW.
2. **Vazão e volume.** $\dot{m}$ = 0,250 kg/kWh × 14,52 kW = 3,63 kg/h, ou 3,63 kg/100 km a 100 km/h. c = 3,63 / 0,75 = 4,84 L/100 km.

Resposta. 4,84 L/100 km, com BSFC de 250 g/kWh.

Interpretação. O resultado é da mesma ordem dos 5,44 L/100 km do exercício 12.13 (η_ICE = 30 %). Aqui 250 g/kWh equivalem a cerca de 34 % no eixo: 1 kWh pede 0,250 kg = 0,333 L = 2,97 kWh de combustível. A diferença 5,44 vs 4,84 vem desse rendimento um pouco melhor.

Erro comum a evitar. Usar 250 g/kWh como se já fosse L/kWh, ou esquecer os rendimentos do gerador e do motor elétrico.

12.26. Carbono da bateria mais o uso em 150 000 km (Desafio)

Enunciado. A fabricação da bateria emite, em um fator ilustrativo, 80 kg CO2 por kWh nominal, e o pacote tem 32,0 kWh. No uso, retome 13,0 kWh/100 km e 80 g CO2/kWh da rede (exercício 12.9). Em 150 000 km, qual é a emissão total e a média em g/km?

Conceito. Soma-se a emissão de fabricação da bateria (uma vez) com a emissão de uso ao longo da vida considerada. A média em g/km é o total dividido pela distância, com as unidades convertidas para gramas.

Fórmula. `E_fab = f_fab E, E_uso = c f_rede s, e = (E_fab + E_uso) / s`

De onde vem. É um balanço de ciclo de vida simplificado, só da bateria e da eletricidade de uso, sem chassi, pneus ou fim de vida. Os fatores são ilustrativos.

Resolução

1. **Fabricação.** E_fab = 80 kg/kWh × 32,0 kWh = 2 560 kg CO2.
2. **Uso.** E_uso = 13,0 kWh/100 km × 80 g/kWh × 1 500 × 100 km = 1 560 kg CO2.
3. **Média.** Total = 2 560 + 1 560 = 4 120 kg. e = 4 120 × 1 000 g / 150 000 km = 27,5 g/km.

Resposta. Fabricação 2 560 kg, uso 1 560 kg, total 4 120 kg CO2, ou 27,5 g/km em 150 000 km.

Interpretação. A fabricação da bateria, neste fator, já é da ordem de 17 g/km diluídos em 150 000 km, e o uso soma 10,4 g/km. O total de 27,5 g/km continua bem abaixo dos 138 g/km de uso do ICE no exercício 12.9, mas mostra que ignorar a fabricação distorce a comparação em vidas curtas.

Erro comum a evitar. Somar 80 kg/kWh com 80 g/kWh sem converter kg e g, ou dividir a fabricação por 100 km no lugar de pela vida inteira.

12.27. Energia e taxa C de uma ultrapassagem (Desafio)

Enunciado. Uma ultrapassagem pede 50 kW na bateria durante 8,0 s (dados de exemplo). Qual energia sai da bateria? Qual é a taxa C instantânea se a energia útil é 32,0 kWh?

Conceito. Energia é potência vezes tempo. A taxa C é a potência dividida pela energia do pacote, com as unidades em kW e kWh (1 C equivale a 1 por hora). Oito segundos são poucos para o estado de carga, mas a taxa C importa para o dimensionamento térmico e de corrente.

Fórmula. `E = P t, C = P / E_útil`

De onde vem. Vêm das definições de energia e de taxa C. Com P em kW e t em horas, E sai em kWh. 8,0 s = 8/3600 h.

Resolução

1. **Energia.** E = 50 × 8 / 3 600 = 0,111 kWh.
2. **Taxa C.** C = 50 / 32,0 = 1,56 C.

Resposta. 0,111 kWh por ultrapassagem; 1,56 C no pico.

Interpretação. A energia é pequena (cerca de 0,11 kWh), irrelevante para a autonomia, mas 1,56 C já é um pedido sério de corrente e de calor. O pacote precisa estar preparado para picos curtos, não só para o cruzeiro de 15 kW.

Erro comum a evitar. Multiplicar 50 kW por 8 s e declarar 400 kWh, esquecendo de converter segundos para horas.

12.28. Três arquiteturas no mesmo ciclo de 14,0 kWh (Desafio)

Enunciado. No ciclo misto de 14,0 kWh nas rodas, compare: um BEV com rendimento bateria-roda 80 %; um híbrido paralelo com η_ICE = 30 % e transmissão 90 %; e um híbrido em série com η_ICE = 30 %, gerador 90 % e inversor-motor 90 %. Dê a energia na fonte e, nos híbridos, o consumo em L/100 km (PCI 8,9 kWh/L).

Conceito. A energia na fonte é a energia nas rodas dividida pelo rendimento da cadeia de cada arquitetura. Os rendimentos em série se multiplicam. O BEV se expressa em kWh; os híbridos também podem ir para L/100 km.

Fórmula. `E_fonte = E_roda / η_cadeia`

De onde vem. É a mesma lógica do exercício 12.3, aplicada a três cadeias. No paralelo, o ICE empurra as rodas pela transmissão; no série, há o elo a mais do gerador.

Resolução

1. **BEV.** E_BEV = 14,0 / 0,80 = 17,5 kWh/100 km.
2. **Paralelo.** E_par = 14,0 / (0,30 × 0,90) = 51,9 kWh/100 km = 5,83 L/100 km.
3. **Série.** E_ser = 14,0 / (0,30 × 0,90 × 0,90) = 57,6 kWh/100 km = 6,47 L/100 km.

Resposta. BEV: 17,5 kWh/100 km. Paralelo: 5,83 L/100 km. Série: 6,47 L/100 km.

Interpretação. O BEV continua bem à frente em energia na fonte. O paralelo, neste modelo, é um pouco mais eficiente do que o série porque não passa pelo gerador. Na prática o série pode recuperar isso se o ICE operar sempre no melhor BSFC, como no exercício 12.25.

Erro comum a evitar. Usar o mesmo rendimento para as três cadeias, ou comparar 17,5 kWh com 5,83 L sem o PCI.

12.29. Energia exportável em V2G (Desafio)

Enunciado. Um up! com 32,0 kWh úteis pode exportar da bateria entre SOC 80 % e 30 %, com rendimento do inversor bidirecional de 90 % (dados de exemplo). Quantos kWh chegam à rede em um ciclo V2G?

Conceito. A energia bruta disponível é a fração da bateria entre os dois SOC. O rendimento do inversor reduz o que de fato chega à rede. O que volta depois na recarga não entra nesta conta.

Fórmula. `E_rede = E_útil (SOC_max − SOC_min) η`

De onde vem. É um balanço de energia: a janela de SOC define a fração útil, e η é o rendimento na direção bateria-rede.

Resolução

1. **Janela de SOC.** ΔSOC = 0,80 − 0,30 = 0,50, ou 50 % de 32,0 kWh = 16,0 kWh na bateria.
2. **Na rede.** E = 16,0 × 0,90 = 14,4 kWh.

Resposta. 14,4 kWh chegam à rede por ciclo, neste exemplo.

Interpretação. Catorze kWh são da ordem do consumo diário de uma casa pequena. O V2G de um único up! já é relevante, mas cada ciclo também envelhece a bateria, o que não entra neste cálculo.

Erro comum a evitar. Aplicar os 90 % sobre 32 kWh inteiros, ou subtrair 80 % − 30 % como se fossem 50 kWh.

12.30. Recarga no meio de uma viagem de 300 km (Desafio)

Enunciado. Uma viagem de 300 km a 14,7 kWh/100 km parte com 32,0 kWh úteis cheios, sem reservas extras. Há um carregador de 50 kW com rendimento 0,95 no caminho, quando a bateria já teria acabado. Qual energia falta e quanto tempo de recarga (sem taper) completa os 300 km?

Conceito. A energia da viagem é o consumo vezes a distância. Se ela excede a bateria cheia, a diferença precisa vir do carregador. O tempo é essa energia dividida pela potência útil (P × η), sem curva de taper.

Fórmula. `E_falta = c s / 100 − E_útil, t = E_falta / (P η)`

De onde vem. É um balanço de viagem: o que a bateria não cobre sai da rede no recarregador. O rendimento 0,95 reduz a potência que de fato entra na bateria.

Resolução

1. **Energia da viagem.** E = 14,7 × 300 / 100 = 44,1 kWh, maior do que 32,0 kWh.
2. **Falta e tempo.** E_falta = 44,1 − 32,0 = 12,1 kWh na bateria. t = 12,1 / (50 × 0,95) = 0,255 h = 15 min, sem taper.

Resposta. Faltam 12,1 kWh; cerca de 15 min em 50 kW (sem taper) completam os 300 km.

Interpretação. A viagem de 300 km não cabe em uma carga, mas uma parada curta de cerca de 15 min resolve, neste modelo idealizado. Na prática o taper, a fila e a reserva de SOC aumentam esse tempo; ainda assim o número mostra por que 50 kW já são úteis em um BEV de 32 kWh.

Erro comum a evitar. Dividir 12,1 kWh por 50 kW esquecendo o rendimento 0,95, ou usar os 246 km do ciclo misto no lugar do consumo a 100 km/h.

Segurança em Sistemas de Alta Tensão (8 h)

13.1. Corrente de um pacote de 400 V (Básico)

Enunciado. Um motor pede 80 kW de um pacote de 400 V (valores de exemplo, desprezando perdas). Qual é a corrente no elo de corrente contínua?

Conceito. No elo CC, a potência é o produto da tensão pela corrente. Isolando a corrente, I = P / V. Em alta tensão a corrente cai, e os cabos e contatores podem ser mais leves.

Fórmula. `I = (P)/(V)`

De onde vem. É a definição de potência elétrica em corrente contínua, P = V I, resolvida para I. As perdas do inversor e dos cabos foram desprezadas, como pede o enunciado.

Resolução

1. **Organizar as unidades.** P = 80 kW = 80 000 W e V = 400 V.
2. **Aplicar a fórmula.** I = 80 000 / 400 = 200 A.

Resposta. I = 200 A.

Interpretação. Duzentos amperes em 400 V já pedem cabos e contatores bem dimensionados. Se a mesma potência viesse de 48 V, a corrente seria cerca de 1 667 A, inviável neste porte.

Erro comum a evitar. Dividir 80 por 400 e obter 0,20 A, esquecendo que 80 kW são 80 000 W.

13.2. Resistência mínima de isolamento (Básico)

Enunciado. A ISO 6469-3 pede, em sistemas de corrente contínua, resistência de isolamento de pelo menos 100 Ω/V. Para um pacote de 400 V, qual é o mínimo? Uma medição de 25 kΩ passaria?

Conceito. A resistência de isolamento é exigida por volt do sistema, para limitar a corrente de fuga à carroceria. O mínimo em ohms é o produto do critério (100 Ω/V neste exemplo) pela tensão do pacote.

Fórmula. `R_mín = 100 Ω/V × V`

De onde vem. É o critério da ISO 6469-3 para sistemas CC, usado aqui de forma ilustrativa: 100 ohms por volt da tensão de trabalho.

Resolução

1. **Mínimo exigido.** R_mín = 100 × 400 = 40 000 Ω = 40 kΩ.
2. **Comparar a medição.** 25 kΩ é menor do que 40 kΩ, então não passa. Em Ω/V: 25 000 / 400 = 62,5 Ω/V, abaixo de 100.

Resposta. R_mín = 40 kΩ. A medição de 25 kΩ não passa.

Interpretação. O isolamento precisa crescer com a tensão: um valor que passaria em 200 V pode falhar em 400 V. A medição de 25 kΩ fica claramente abaixo do piso de 40 kΩ.

Erro comum a evitar. Comparar 25 kΩ com 100 Ω, esquecendo o fator por volt, ou usar 100 × 400 = 40 Ω no lugar de 40 kΩ.

13.3. Tempo de descarga do capacitor do inversor (Básico)

Enunciado. O elo CC do inversor tem C = 800 µF carregado a 400 V e um resistor de descarga de 4,7 kΩ (dados de exemplo). Em quanto tempo a tensão cai a 60 V? Se o critério ilustrativo for ‘abaixo de 60 V em 5 s’, o resistor atende? Qual seria o máximo aceitável?

Conceito. O capacitor descarrega em um circuito RC: a tensão cai exponencialmente. O tempo até uma tensão residual V é t = −RC ln(V/V0). A energia armazenada é ½ C V0², e precisa ser dissipada com segurança depois que se abre o contato HV.

Fórmula. `t = − R C ln(V / V_0), E = ½ C V_0²`

De onde vem. A lei do capacitor i = C dV/dt com V = R i leva à exponencial V(t) = V0 exp(−t/(RC)). Isola-se t e, à parte, a energia eletrostática ½ C V².

Resolução

1. **Constante de tempo.** RC = 4 700 × 800×10⁻⁶ = 3,76 s.
2. **Tempo até 60 V.** t = −3,76 × ln(60/400) = 3,76 × 1,897 = 7,13 s. Com 4,7 kΩ não atende o critério de 5 s.
3. **R máximo e energia.** R ≤ 5 / (−C ln(60/400)) = 3,29 kΩ. E = 0,5 × 800×10⁻⁶ × 400² = 64 J.

Resposta. t = 7,13 s com 4,7 kΩ (não atende o critério de 5 s). Seria preciso R ≤ 3,29 kΩ. A energia no capacitor é 64 J.

Interpretação. Sete segundos acima de 60 V é tempo demais para um serviço no compartimento HV, neste critério ilustrativo. Um resistor menor acelera a descarga, mas dissipa um pico de potência maior (veja o exercício 13.5).

Erro comum a evitar. Usar t = RC ou t = 5 RC no lugar de −RC ln(V/V0), ou esquecer de converter 800 µF e 4,7 kΩ para o SI.

13.4. Corrente de curto no elo, sem indutância (Básico)

Enunciado. Se o elo de 400 V for curto-circuitado por uma resistência de cabo de 20 mΩ, desprezando a indutância (modelo ilustrativo e conservador), qual é a corrente inicial?

Conceito. Na lei de Ohm, a corrente inicial é V / R. Sem a indutância do barramento o valor é um teto teórico: na prática a indutância limita o di/dt, mas o número já mostra por que fusíveis e contatores HV precisam ser muito rápidos.

Fórmula. `I = V / R`

De onde vem. É a lei de Ohm no instante inicial, com a tensão do capacitor ainda em V e a resistência do caminho de falta igual a R.

Resolução

1. **Converter R.** 20 mΩ = 0,020 Ω.
2. **Aplicar Ohm.** I = 400 / 0,020 = 20 000 A.

Resposta. I = 20 000 A, neste modelo sem indutância.

Interpretação. Vinte quiloamperes é uma ordem de grandeza de laboratório e de falha grave, não de operação. O exercício 13.1 tinha 200 A nominais; o curto é cem vezes isso.

Erro comum a evitar. Usar 20 Ω no lugar de 20 mΩ, o que daria só 20 A, ou esquecer de converter mΩ para ohm.

13.5. Potência de pico no resistor de descarga (Básico)

Enunciado. No resistor de 4,7 kΩ do exercício 13.3, com o elo ainda em 400 V, qual é a potência de pico? Um resistor de 25 W contínuos, sem folga de pico, atenderia esse instante inicial?

Conceito. A potência no resistor é V^2/R. O pico ocorre no instante inicial, quando a tensão ainda é a do elo. Depois a potência cai com o quadrado da exponencial, mas o componente precisa sobreviver a esse pico e à energia de 64 J.

Fórmula. `P = V² / R`

De onde vem. É a potência instantânea em um resistor, $P = V\,I = V^2/R$, com V igual à tensão do capacitor no instante considerado.

Resolução

1. **Potência de pico.** $P = 400^2 / 4\,700 = 160\,000 / 4\,700 = 34{,}0$ W.
2. **Comparar com 25 W.** 34,0 W é maior do que 25 W, então um resistor de 25 W contínuos, sem folga de pico, não atenderia o instante inicial.

Resposta. P_pico = 34,0 W. Um resistor de 25 W contínuos, sem folga, não atende o instante inicial.

Interpretação. O pico é breve, e a energia total é só 64 J, mas a folga térmica e o tipo do resistor (pulse-rated) importam tanto quanto a potência contínua impressa no corpo.

Erro comum a evitar. Calcular P = V I com I do exercício 13.1 (200 A), o que daria 80 kW, como se o resistor de descarga levasse a corrente do motor.

13.6. Corrente pelo corpo com isolamento no limite (Básico)

Enunciado. O isolamento está exatamente no mínimo do exercício 13.2 (40 kΩ) e uma pessoa equivalente a 1 000 Ω toca a carroceria e um polo do pacote de 400 V (modelo ilustrativo). Qual é a corrente no corpo?

Conceito. A corrente de toque percorre o isolamento em série com a resistência do corpo. É um modelo grosseiro, mas já mostra a ordem de grandeza do que o critério de 100 Ω/V tenta limitar.

Fórmula. `I = V / (R_iso + R_corpo)`

De onde vem. É a lei de Ohm no divisor formado pelo isolamento e pelo corpo, com a tensão do pacote aplicada ao conjunto em série.

Resolução

1. **Resistência total.** R = 40 000 + 1 000 = 41 000 Ω.
2. **Corrente.** I = 400 / 41 000 = 9,76 mA.

Resposta. I = 9,76 mA, neste modelo de 1 000 Ω.

Interpretação. Cerca de 10 mA já é uma corrente perceptível e, conforme o caminho, pode ser perigosa. Por isso o isolamento mínimo e o interlock existem juntos: o critério de 40 kΩ não é um convite a tocar o sistema.

Erro comum a evitar. Calcular I = 400 / 40 000 = 10 mA esquecendo o corpo, ou usar 1 000 kΩ no lugar de 1 000 Ω.

13.7. Energia armazenada e limiar de 0,20 J (Básico)

Enunciado. A energia do capacitor do exercício 13.3 é 64 J. Um limiar ilustrativo de ‘extra-baixa energia’ de 0,20 J seria atendido? Quantas vezes 64 J supera esse limiar?

Conceito. A energia eletrostática ½ C V² mede o que precisa ser dissipado ou isolado quando se abre o pacote. Limiares baixos, da ordem de frações de joule, servem para peças que alguém possa tocar; o elo do inversor está muito acima disso e por isso tem resistor de descarga.

Fórmula. `E = ½ C V², n = E / E_lim`

De onde vem. A energia do capacitor é a expressão clássica da eletrostática. A comparação com 0,20 J é um critério ilustrativo de folga, não um valor oficial reproduzido aqui.

Resolução

1. **Energia.** E = 0,5 × 800×10⁻⁶ × 400² = 64 J, como no exercício 13.3.
2. **Comparar.** 64 / 0,20 = 320 vezes o limiar de 0,20 J. Não atende.

Resposta. Não atende: 64 J é 320 vezes o limiar ilustrativo de 0,20 J.

Interpretação. Por isso a descarga obrigatória (exercício 13.3) e o interlock existem: o elo armazena dezenas de joules, não uma fração de joule tocável.

Erro comum a evitar. Comparar 64 J com 0,20 J como se fossem a mesma ordem, ou calcular ½ C V no lugar de ½ C V².

13.8. Seção do cabo pela densidade de corrente (Básico)

Enunciado. A corrente nominal do exercício 13.1 é 200 A. Adote uma densidade de corrente ilustrativa de 3,0 A/mm² para cabo de cobre em regime contínuo. Qual seção mínima resulta? Qual bitola comercial imediatamente acima, entre 50, 70 e 95 mm², você escolheria?

Conceito. A seção é a corrente dividida pela densidade admissível. O valor 3,0 A/mm² é um ponto de partida de exemplo; o projeto real considera temperatura, agrupamento, isolamento e norma de cabos automotivos.

Fórmula. `S = I / J`

De onde vem. É a definição de densidade de corrente J = I / S, isolando a seção. A escolha da bitola comercial é o primeiro valor padronizado acima de S.

Resolução

1. **Seção mínima.** S = 200 / 3,0 = 66,7 mm².
2. **Bitola comercial.** 50 mm² fica abaixo. 70 mm² é a primeira acima de 66,7 mm².

Resposta. S = 66,7 mm²; escolher 70 mm² entre as bitolas de exemplo.

Interpretação. A 200 A, 70 mm² é um cabo grosso, típico de um elo HV de dezenas de kW. Se a densidade admissível cair (calor, agrupamento), a seção sobe ainda mais.

Erro comum a evitar. Multiplicar 200 × 3,0 e obter 600 mm², invertendo a fórmula, ou escolher 50 mm² por ser o valor ‘redondo’ abaixo do mínimo.

13.9. Classe de tensão de um pacote de 400 V (Básico)

Enunciado. Em uma classificação ilustrativa usual, a classe B de tensão em veículos cobre mais de 60 V até 1 500 V em corrente contínua (e faixas equivalentes em CA). O pacote de 400 V do up! de exemplo está em que classe? E um sistema de 48 V?

Conceito. As classes de tensão separam o que se trata como extra-baixa (manuseio diferente, ainda com cuidado) do que exige procedimentos e proteções de alta tensão: cor laranja, interlock, isolamento reforçado.

Fórmula. `classe B CC: acima de 60 V e até 1 500 V`

De onde vem. É a divisão usual de classes de tensão em sistemas veiculares, usada aqui só para situar 48 V e 400 V. Os limites exatos e os nomes podem variar conforme a norma adotada no projeto.

Resolução

1. **400 V.** 400 V está acima de 60 V e abaixo de 1 500 V, portanto na classe B (alta tensão veicular, neste critério).
2. **48 V.** 48 V está abaixo de 60 V, então fica fora da classe B e se trata como sistema de 48 V / extra-baixa, ainda com regras próprias.

Resposta. O pacote de 400 V está na classe B. O sistema de 48 V fica abaixo desse limiar de 60 V.

Interpretação. A fronteira de 60 V explica por que 48 V se espalhou em mild hybrids: há ganho elétrico com menos do rito de alta tensão. Já 400 V pede o pacote completo de segurança HV.

Erro comum a evitar. Tratar 400 V como baixa tensão só porque é menor do que a rede de 1 000 V, ou classificar 48 V como classe B.

13.10. Corrente de fuga com isolamento degradado (Básico)

Enunciado. O monitor de isolamento mede 20 kΩ entre o pacote de 400 V e a carroceria. Qual é a corrente de fuga aproximada? Em Ω/V, o valor passaria no critério de 100 Ω/V do exercício 13.2?

Conceito. A corrente de fuga aproximada é V / R, se o outro polo estiver referenciado à carroceria pelo monitor ou por um segundo defeito. Em paralelo, converte-se a medição para Ω/V e compara-se com o critério.

Fórmula. `I_fuga = V / R, r = R / V`

De onde vem. A primeira expressão é a lei de Ohm. A segunda é a resistência específica já usada no exercício 13.2.

Resolução

1. **Corrente de fuga.** I = 400 / 20 000 = 0,020 A = 20 mA.
2. **Ω/V e critério.** r = 20 000 / 400 = 50 Ω/V, abaixo de 100 Ω/V. Não passa.

Resposta. I_fuga ≈ 20 mA; 50 Ω/V, não passa no critério de 100 Ω/V.

Interpretação. Vinte miliamperes já é mais do que o toque do exercício 13.6 no isolamento mínimo, e o monitor deveria alarmar. 20 kΩ em 400 V é metade do piso de 40 kΩ.

Erro comum a evitar. Declarar 20 kΩ como 20 Ω/V, ou calcular 400 / 20 = 20 A, esquecendo que a medição está em quilo-ohms.

13.11. Isolamento equivalente dos dois polos (Intermediário)

Enunciado. O monitor vê 80 kΩ do polo positivo à carroceria e 80 kΩ do negativo à carroceria (dados de exemplo). Qual é a resistência equivalente de isolamento? Esse valor atende o mínimo de 40 kΩ do exercício 13.2?

Conceito. Os dois caminhos de fuga, positivo-carroceria e negativo-carroceria, estão em paralelo do ponto de vista do isolamento do pacote. A resistência equivalente é a associação em paralelo das duas medições.

Fórmula. `1 / R_eq = 1 / R_+ + 1 / R_−`

De onde vem. É a regra das resistências em paralelo: as correntes de fuga se somam, o que equivale a inversos das resistências se somarem.

Resolução

1. **Paralelo.** R_eq = (80 × 80) / (80 + 80) = 6 400 / 160 = 40 kΩ.
2. **Critério.** 40 kΩ é exatamente o mínimo do exercício 13.2. Atende, mas sem folga.

Resposta. R_eq = 40 kΩ, exatamente no mínimo de 40 kΩ. Atende, sem folga.

Interpretação. Medir 80 kΩ em cada polo parece folgado, mas o paralelo devolve o piso de 40 kΩ. Por isso o monitor avalia o isolamento do sistema, não um polo isolado.

Erro comum a evitar. Somar 80 kΩ + 80 kΩ = 160 kΩ, como se as resistências estivessem em série, ou usar só o menor dos dois valores.

13.12. Corrente de fuga no critério de 100 Ω/V (Intermediário)

Enunciado. No critério de 100 Ω/V, qual é a corrente de fuga máxima em 400 V? Mostre que, neste critério, essa corrente não depende da tensão do pacote.

Conceito. Se R_mín = 100 Ω/V × V, a corrente de fuga no limite é I = V / R_mín = 1/100 A, constante. O critério por volt fixa a corrente, não a resistência absoluta.

Fórmula. `I = V / (k V) = 1 / k`

De onde vem. Substitui-se R_mín = k V na lei de Ohm. Com k = 100 Ω/V, I = 1/100 = 10 mA, qualquer que seja V.

Resolução

1. **Em 400 V.** R_mín = 40 kΩ, I = 400 / 40 000 = 10 mA.
2. **Independência de V.** I = 1 / 100 = 0,010 A = 10 mA, para qualquer tensão. Em 200 V ou 800 V o limite de corrente é o mesmo.

Resposta. I = 10 mA em 400 V, e também em qualquer outra tensão, com 100 Ω/V.

Interpretação. O critério de 100 Ω/V é, no fundo, um teto de 10 mA de fuga. A resistência mínima sobe com a tensão só para manter essa corrente.

Erro comum a evitar. Achar que em 800 V a corrente de fuga permitida dobra, esquecendo que R_mín também dobra.

13.13. Tensão de toque no condutor de ligação à massa (Intermediário)

Enunciado. A ligação equipotencial entre a carroceria e o ponto de massa do pacote tem 5,0 mΩ (valor de exemplo). Qual é a tensão de toque se passar uma corrente de falta de 200 A? E se a falta for de 2 000 A?

Conceito. A tensão de toque é a queda ôhmica no condutor de massas: V = R I. Um bonding de miliohms parece desprezível em 200 A nominais, mas em uma falta de quiloamperes a queda sobe na mesma proporção.

Fórmula. `V_toque = R_eq I_falta`

De onde vem. É a lei de Ohm no condutor de ligação à massa, com a corrente de falta atravessando essa resistência.

Resolução

1. **Em 200 A.** V = 0,005 × 200 = 1,0 V.
2. **Em 2 000 A.** V = 0,005 × 2 000 = 10,0 V.

Resposta. 1,0 V em 200 A e 10,0 V em 2 000 A.

Interpretação. Um volt é inofensivo; dez volts em falta já pedem atenção ao comprimento e à seção do bonding. Se essa ligação se abrir, a tensão de toque pode ir a centenas de volts, como no exercício 13.30.

Erro comum a evitar. Usar 5 Ω no lugar de 5 mΩ, o que daria 1 000 V em 200 A, ou esquecer de converter mΩ para ohm.

13.14. Tensão residual 3 s após abrir o serviço (Intermediário)

Enunciado. Com C = 800 µF, R = 4,7 kΩ e V0 = 400 V do exercício 13.3, qual é a tensão do elo 3,0 s depois de aberto o contato HV? Essa tensão ainda está acima de 60 V?

Conceito. A descarga é exponencial: V(t) = V0 exp(−t/(RC)). Três segundos são menos do que a constante de tempo de 3,76 s, então a tensão residual ainda é uma fração importante de 400 V.

Fórmula. `V(t) = V_0 exp(−t / (R C))`

De onde vem. É a mesma solução do circuito RC do exercício 13.3, agora avaliada em um instante fixo de 3 s, típico de um tempo de espera após o desconectador de serviço.

Resolução

1. **Constante de tempo.** RC = 4 700 × 800×10^{-6} = 3,76 s.
2. **Tensão em 3 s.** V = 400 × exp(−3 / 3,76) = 400 × 0,450 = 180 V, ainda bem acima de 60 V.

Resposta. V(3 s) = 180 V, ainda acima de 60 V.

Interpretação. Esperar só 3 s com o resistor de 4,7 kΩ não basta: o elo continua perigoso. O critério de 5 s do exercício 13.3, e um R menor, existem precisamente para esse momento de serviço.

Erro comum a evitar. Usar uma queda linear 400 × (1 − 3/5), ou achar que depois de 1×RC a tensão já é zero.

13.15. Limiar de 60 V e tempo até a faixa segura (Intermediário)

Enunciado. Adote 60 V como limiar ilustrativo abaixo do qual o elo deixa de ser tratado como alta tensão acessível. Com C = 800 µF e o R máximo de 3,29 kΩ do exercício 13.3, em quanto tempo a tensão parte de 400 V e atinge 60 V? Compare com o resistor original de 4,7 kΩ.

Conceito. O tempo até o limiar é o mesmo $t = -RC \ln(V/V0)$ do exercício 13.3. Reduzir R encurta t na mesma proporção, porque C e o logaritmo não mudam.

Fórmula. `t = − R C ln(V / V_0)`

De onde vem. É a inversão da exponencial do circuito RC, já usada para dimensionar o resistor máximo que cumpre 5 s.

Resolução

1. **Com 3,29 kΩ.** RC = 3 290 × 800×10⁻⁶ = 2,63 s. t = −2,63 × ln(60/400) = 2,63 × 1,897 = 5,00 s.
2. **Com 4,7 kΩ.** t = 7,13 s, como no exercício 13.3, ou 43 % mais lento.

Resposta. Com 3,29 kΩ, t = 5,00 s. Com 4,7 kΩ, t = 7,13 s.

Interpretação. O limiar de 60 V é o mesmo da classe de tensão do exercício 13.9: abaixo dele o elo deixa de ser tratado como HV acessível, neste critério ilustrativo. O R de 3,29 kΩ foi escolhido justamente para cumprir 5 s.

Erro comum a evitar. Usar t = 5 RC, ou esquecer o sinal negativo no logaritmo de uma fração menor do que 1.

13.16. Isolamento em 500 Ω/V para um lado CA (Intermediário)

Enunciado. Para um trecho em corrente alternada de 230 V, um critério ilustrativo pede 500 Ω/V (mais exigente do que os 100 Ω/V do lado CC). Qual é a resistência mínima? Quantas vezes ela é maior do que o mínimo CC de 40 kΩ em 400 V?

Conceito. O critério por volt é o mesmo tipo do exercício 13.2, só que o valor k é maior em CA, porque a corrente alternada é, em geral, mais perigosa para o corpo em uma mesma amplitude.

Fórmula. `R_mín = k × V`

De onde vem. É o produto do critério (500 Ω/V) pela tensão eficaz do lado CA. A comparação com o mínimo CC usa os dois resultados em ohms.

Resolução

1. **Mínimo CA.** R_mín,CA = 500 × 230 = 115 000 Ω = 115 kΩ.
2. **Comparar com o CC.** 115 / 40 = 2,88. O mínimo CA é cerca de 2,9 vezes o de 40 kΩ.

Resposta. R_mín = 115 kΩ, cerca de 2,9 vezes os 40 kΩ do lado CC.

Interpretação. Mesmo em 230 V, menor do que 400 V, o critério mais rígido de 500 Ω/V pede mais isolamento do que o elo CC. Os dois lados do inversor têm pisos diferentes.

Erro comum a evitar. Usar 100 Ω/V também no lado CA, ou calcular 500 × 230 = 115 Ω no lugar de 115 kΩ.

13.17. Pré-carga do capacitor do inversor (Intermediário)

Enunciado. Antes de fechar o contator principal, um resistor de pré-carga de 100 Ω carrega o capacitor de 800 µF a partir de 400 V (dados de exemplo). Qual é a constante de tempo, o tempo até cerca de 99 % (5 constantes) e a corrente de pico inicial?

Conceito. A pré-carga evita que o capacitor, ao ser ligado de um salto, peça dezenas de quiloamperes ao pacote. Com um resistor, a corrente inicial é V/R e a tensão sobe com 1 − exp(−t/RC).

Fórmula. `τ = R C, I_pico = V / R, t_99% ≈ 5 τ`

De onde vem. A carga de um capacitor em série com R é a complementar da descarga do exercício 13.3. Em 5 constantes de tempo a exponencial já chegou a cerca de 99 %.

Resolução

1. **Constante e tempo.** $\tau = 100 \times 800\times10^{-6} = 0{,}080$ s = 80 ms. $5\tau = 400$ ms.
2. **Corrente de pico.** I_pico = 400 / 100 = 4,0 A, bem abaixo dos 20 000 A do curto do exercício 13.4.

Resposta. τ = 80 ms; t_99% ≈ 400 ms; I_pico = 4,0 A.

Interpretação. Quatrocentos milissegundos e 4 A são compatíveis com um fechamento de contato confortável. Sem o resistor, o mesmo capacitor pediria uma corrente de curto no instante inicial.

Erro comum a evitar. Usar o resistor de descarga (4,7 kΩ) no lugar dos 100 Ω da pré-carga, ou calcular 5τ como 5 ms no lugar de 400 ms.

13.18. Corrente de pico com a indutância do barramento (Intermediário)

Enunciado. Retome o curto do exercício 13.4, agora com uma indutância de barramento de 5,0 µH e C = 800 µF a 400 V, desprezando a resistência (modelo LC ilustrativo). Qual é a corrente de pico e a energia envolvida?

Conceito. Sem resistência, a energia do capacitor vai toda para o indutor no primeiro quarto de período: ½ C V² = ½ L I_pico², logo I_pico = V √(C/L). A resistência do exercício 13.4 limita o valor estacionário; a indutância limita o transitório.

Fórmula. `I_pico = V √(C / L), E = ½ C V²`

De onde vem. Conservação de energia no circuito LC sem perdas. É um teto do transitório; com resistência o pico é menor.

Resolução

1. **Corrente de pico.** $I = 400 \times \sqrt{(800\times10^{-6} / 5{,}0\times10^{-6})} = 400 \times \sqrt{160} = 400 \times 12{,}65 = 5\,060$ A.
2. **Energia.** $E = 0{,}5 \times 800\times10^{-6} \times 400^2 = 64$ J, a mesma do exercício 13.3.

Resposta. I_pico ≈ 5 060 A; E = 64 J.

Interpretação. Cinco quiloamperes ainda é um curto grave, mas bem menor do que os 20 000 A do modelo só resistivo. A indutância do barramento, embora pequena, já limita o transitório.

Erro comum a evitar. Usar I = V / L, misturando unidades, ou esquecer de converter µF e µH para o SI.

13.19. Derating do cabo a 80 °C (Intermediário)

Enunciado. O cabo de 70 mm² do exercício 13.8 leva 200 A nominais. A 80 °C, um fator ilustrativo de derating reduz a corrente admissível para 170 A. O cabo ainda atende o regime contínuo de 200 A? Qual seria a nova seção mínima com J = 3,0 A/mm² aplicado sobre 200 A, se você quiser folga térmica equivalente a trabalhar a 170/200 da densidade original?

Conceito. A temperatura ambiente e o agrupamento reduzem a corrente que o cabo pode levar em contínuo. Se a corrente admissível cair abaixo da nominal, é preciso bitola maior, melhor refrigeração ou reduzir a corrente contínua.

Fórmula. `I_adm = k_θ I_ref, S = I / (k_θ J)`

De onde vem. O fator k_θ é um derating de catálogo, usado aqui de forma ilustrativa (170/200 = 0,85). A seção cresce na inversa desse fator se a corrente de projeto não mudar.

Resolução

1. **Comparar correntes.** 170 A é menor do que 200 A, então o cabo de 70 mm², nesta condição, não atende o contínuo de 200 A.
2. **Nova seção.** k_θ = 170/200 = 0,85. S = 200 / (0,85 × 3,0) = 78,4 mm², o que pediria a bitola de 95 mm² entre 70 e 95.

Resposta. Não atende: 170 A < 200 A. A nova seção mínima seria 78,4 mm² (95 mm² entre as bitolas de exemplo).

Interpretação. A bitola escolhida ‘no limite’ a 3,0 A/mm² e 25 °C pode ficar curta em um cofre quente. Derating e folga térmica fazem parte do projeto do elo, não só a conta fria do exercício 13.8.

Erro comum a evitar. Manter 70 mm² porque ‘já passou na conta de 200 A’, ignorando a temperatura, ou aplicar o fator 0,85 sobre a seção no lugar da densidade.

13.20. Falta à carroceria e dispositivo de 10 mA (Intermediário)

Enunciado. Um dispositivo ilustrativo deve atuar com 10 mA de fuga à carroceria no pacote de 400 V. Qual é a maior resistência de falta que ainda provoca a atuação? Compare com o isolamento mínimo de 40 kΩ do exercício 13.2.

Conceito. A corrente de falta é V / R_falta. O dispositivo atua enquanto R_falta for menor ou igual a V / I_atuação. Esse valor coincide, neste critério, com o isolamento mínimo de 100 Ω/V, porque 10 mA é exatamente 1/100 A.

Fórmula. `R_máx = V / I_atuação`

De onde vem. É a lei de Ohm isolando a resistência que produz exatamente a corrente de atuação.

Resolução

1. **Resistência de atuação.** R_máx = 400 / 0,010 = 40 000 Ω = 40 kΩ.
2. **Comparar.** É o mesmo valor do isolamento mínimo de 40 kΩ: no limite de 100 Ω/V, a fuga já é 10 mA (exercício 13.12).

Resposta. R_máx = 40 kΩ, igual ao isolamento mínimo de 40 kΩ.

Interpretação. A coincidência não é acaso: o critério de 100 Ω/V e um limiar de 10 mA descrevem a mesma corrente de fuga. O monitor e o dispositivo de atuação olham o mesmo fenômeno por ângulos diferentes.

Erro comum a evitar. Calcular 400 / 10 = 40 Ω, usando 10 A no lugar de 10 mA.

13.21. Dois critérios ao mesmo tempo: 100 Ω/V e 2 mA (Desafio)

Enunciado. Além dos 100 Ω/V, um projeto ilustrativo limita a fuga a 2,0 mA no pacote de 400 V. Qual resistência satisfaz os dois critérios? Qual dos dois é o mais exigente?

Conceito. Cada critério vira uma resistência mínima: k V para o primeiro e V / I_máx para o segundo. O projeto precisa atender o maior dos dois mínimos.

Fórmula. `R ≥ máx(k V, V / I_máx)`

De onde vem. O primeiro piso é o da ISO ilustrativa do exercício 13.2. O segundo é a lei de Ohm com a corrente máxima admitida pelo projeto.

Resolução

1. **Piso de 100 Ω/V.** R1 = 100 × 400 = 40 kΩ.
2. **Piso de 2 mA.** R2 = 400 / 0,002 = 200 kΩ = 500 Ω/V. O mais exigente é 200 kΩ.

Resposta. R ≥ 200 kΩ. O limite de 2 mA é o mais exigente (500 Ω/V), acima dos 40 kΩ.

Interpretação. Atender só a ISO ilustrativa de 100 Ω/V não basta quando o projeto impõe 2 mA. Os dois números precisam ser checados, e o mais conservador vence.

Erro comum a evitar. Somar 40 kΩ com 200 kΩ, ou achar que 2 mA é menos rigoroso do que 10 mA do exercício 13.12 e por isso pediria menos isolamento.

13.22. Aquecimento do resistor de descarga (Desafio)

Enunciado. Os 64 J do capacitor do exercício 13.3 são dissipados em um resistor de cerâmica de 2,0 g, com calor específico ilustrativo de 800 J/(kg·K), sem troca de calor no instante do pulso. Qual é a elevação de temperatura?

Conceito. Se a energia entra toda como calor no corpo do resistor, ΔT = E / (m c). O pulso é curto, então o modelo adiabático é um bom ponto de partida para ver se o componente sobrevive à energia, não só à potência de pico do exercício 13.5.

Fórmula. `ΔT = E / (m c)`

De onde vem. É o balanço térmico Q = m c ΔT, com Q igual à energia eletrostática ½ C V².

Resolução

1. **Massa no SI.** m = 2,0 g = 0,002 kg.
2. **Elevação.** ΔT = 64 / (0,002 × 800) = 64 / 1,6 = 40 K.

Resposta. ΔT = 40 K, neste modelo adiabático.

Interpretação. Quarenta kelvin em um pulso só é aceitável para muita cerâmica, mas pulsos repetidos, ou um resistor menor, podem ultrapassar o limite. A energia de 64 J e a potência de 34 W precisam ser vistas juntas.

Erro comum a evitar. Usar m = 2 kg no lugar de 2 g, o que daria 0,04 K, ou esquecer de converter gramas para quilogramas.

13.23. Contator soldado e a curva de pré-carga (Desafio)

Enunciado. Na pré-carga do exercício 13.17 (R = 100 Ω, C = 800 µF, V = 400 V), o diagnóstico espera uma subida exponencial. Se um contator principal estiver soldado (fechado de antemão), a tensão do elo já é 400 V no instante t = 0. Qual tensão o diagnóstico lê em t = 0 e em t = 80 ms, no caso sadio e no caso soldado?

Conceito. Com o contator sadio, a tensão parte de zero e em uma constante de tempo chega a 63 % de 400 V, ou 252 V. Se o contato já está fechado, o capacitor já está em 400 V e a curva não sobe. Essa diferença é um diagnóstico clássico de soldagem.

Fórmula. `V_sadio(t) = V (1 − exp(−t / (R C))), V_soldado(t) = V`

De onde vem. A primeira é a carga RC do exercício 13.17. A segunda é a condição de contorno de um capacitor já ligado ao pacote.

Resolução

1. **Caso sadio.** V(0) = 0. Em t = τ = 80 ms, V = 400 × (1 − e⁻¹) = 400 × 0,632 = 253 V.
2. **Caso soldado.** V(0) = V(80 ms) = 400 V. O diagnóstico vê 400 V imediatamente, sem rampa.

Resposta. Sadio: 0 V em t = 0 e 253 V em 80 ms. Soldado: 400 V nos dois instantes.

Interpretação. Se a tensão do elo já nasce em 400 V, não se fecha o segundo contato e não se libera o veículo: o risco é soldar de vez ou alimentar um curto. A rampa da pré-carga é, também, um teste de integridade.

Erro comum a evitar. Achar que o caso soldado também parte de zero, ou usar $e^{-1} \approx 0{,}5$ no lugar de 0,632.

13.24. A mesma potência em 48 V e em 400 V (Desafio)

Enunciado. Retome os 80 kW do exercício 13.1. Qual seria a corrente se a mesma potência viesse de um barramento de 48 V, desprezando perdas? Quantas vezes essa corrente é maior do que os 200 A em 400 V?

Conceito. A potência em CC é V I, então a corrente cai na mesma proporção em que a tensão sobe. Essa é a razão de ser da alta tensão no trem de força: cabos, contatores e perdas Joule ficam tratáveis.

Fórmula. `I = P / V, n = I_48 / I_400 = 400 / 48`

De onde vem. É a mesma definição do exercício 13.1, aplicada às duas tensões. A razão das correntes é o inverso da razão das tensões, porque P é a mesma.

Resolução

1. **Corrente em 48 V.** I_48 = 80 000 / 48 = 1 667 A.
2. **Razão.** 1 667 / 200 = 8,33, que é exatamente 400 / 48.

Resposta. I_48 = 1 667 A, 8,33 vezes os 200 A em 400 V.

Interpretação. Mil seiscentos amperes contínuos são irreais neste porte: a seção do cabo, as perdas e o contator saem do que um hatch cabe. Por isso 48 V aparece em mild hybrids de poucos quilowatts, e não no motor de 80 kW.

Erro comum a evitar. Dividir 80 por 48 e obter 1,67 A, esquecendo os 80 000 W, ou usar 48 / 400 no lugar de 400 / 48.

13.25. Fuga pelo líquido de arrefecimento (Desafio)

Enunciado. Uma fuga ilustrativa pelo líquido de arrefecimento aparece como 10 kΩ entre o pacote de 400 V e a carroceria. Qual é a corrente de fuga e o valor em Ω/V? O conjunto passaria no critério de 100 Ω/V?

Conceito. O líquido, os tubos e o trocador podem formar um caminho de fuga paralelo ao isolamento sólido. O monitor vê só a resistência equivalente, e o critério é o mesmo do exercício 13.2.

Fórmula. `I = V / R, r = R / V`

De onde vem. Lei de Ohm e resistência específica, como no exercício 13.10, agora com um valor típico de degradação por umidade ou condutividade do fluido.

Resolução

1. **Corrente e Ω/V.** I = 400 / 10 000 = 0,040 A = 40 mA. r = 10 000 / 400 = 25 Ω/V.
2. **Critério.** 25 Ω/V é menor do que 100 Ω/V; 10 kΩ também é menor do que 40 kΩ. Não passa.

Resposta. I = 40 mA; 25 Ω/V; não passa no critério de 100 Ω/V.

Interpretação. Quarenta miliamperes já é quatro vezes o teto de 10 mA do exercício 13.12. Uma fuga pelo fluido é um defeito grave: o veículo deveria alarmar e, conforme a estratégia, limitar ou abrir o pacote.

Erro comum a evitar. Tratar 10 kΩ como se já fosse maior do que 100 Ω/V, ou calcular 400 / 10 = 40 A, esquecendo o quilo-ohm.

13.26. Tempo de atuação pelo I²t do fusível (Desafio)

Enunciado. Um fusível HV de exemplo tem I²t de fusão de 50 000 A²s. No curto de 20 000 A do exercício 13.4 (modelo sem indutância), em quanto tempo o fusível atua, se a corrente puder ser considerada constante nesse intervalo?

Conceito. O I²t mede a energia térmica específica que funde o elo. Com corrente constante, t = (I²t) / I². É um modelo de pulso curto, útil para ver se o fusível é muito mais rápido do que os contatores.

Fórmula. `t = (I²t) / I²`

De onde vem. Por definição, $I^2t = \int I^2\,dt$. Se I é constante no pulso, a integral vira $I^2\,t$, e isola-se t.

Resolução

1. **Aplicar a definição.** t = 50 000 / (20 000)² = 50 000 / 400 000 000 = 0,000125 s = 125 µs.

Resposta. t = 125 µs, neste modelo de corrente constante.

Interpretação. Cento e vinte e cinco microssegundos é muito mais rápido do que um contator mecânico. O fusível é a proteção terminal do curto violento; o modelo ignora a indutância do exercício 13.18, que reduziria a corrente e alongaria um pouco o tempo.

Erro comum a evitar. Calcular t = 50 000 / 20 000 = 2,5 s, esquecendo o quadrado da corrente, ou misturar I²t com energia em joules sem a resistência.

13.27. Conferência: 3,29 kΩ deve chegar a 60 V em 5 s (Desafio)

Enunciado. O exercício 13.3 dimensionou R = 3,29 kΩ para que 800 µF partindo de 400 V chegasse a 60 V em 5,0 s. Confirme a tensão residual em 5,0 s com esse resistor.

Conceito. A verificação inversa da exponencial fecha o ciclo de projeto: calcula-se V(t) = V0 exp(−t/(RC)) no tempo-critério e compara-se com o limiar de 60 V. Um arredondamento de R pode deixar a tensão um pouco acima ou abaixo.

Fórmula. `V(t) = V_0 exp(−t / (R C))`

De onde vem. É a mesma solução RC dos exercícios 13.3 e 13.14, agora no par (R, t) que tinha sido projetado para o limiar.

Resolução

1. **Constante de tempo.** RC = 3 290 × 800×10⁻⁶ = 2,632 s.
2. **Tensão em 5 s.** V = 400 × exp(−5 / 2,632) = 400 × 0,1496 = 59,8 V, praticamente os 60 V de projeto.

Resposta. V(5 s) = 59,8 V, alinhado com o limiar de 60 V.

Interpretação. O arredondamento de 3,29 kΩ deixa 0,2 V de folga, irrelevante para o critério. A conta fecha, e o resistor de 4,7 kΩ do enunciado original é que não cumpria os 5 s.

Erro comum a evitar. Usar 3,29 Ω no lugar de 3,29 kΩ, ou avaliar exp(−5 × 2,632) no lugar de exp(−5 / 2,632).

13.28. Ensaio de isolamento a 1 000 V (Desafio)

Enunciado. Um ensaio ilustrativo aplica 1 000 V CC e mede 5,0 MΩ entre o pacote e a carroceria. Qual é a corrente no ensaio? Em Ω/V da tensão de trabalho de 400 V, o isolamento passaria nos 100 Ω/V?

Conceito. O ensaio usa uma tensão maior do que a de trabalho para estressar o isolamento. A corrente é V_ensaio / R; a aprovação em serviço, porém, compara R com a tensão de trabalho, não com os 1 000 V.

Fórmula. `I = V_ensaio / R, r = R / V_trabalho`

De onde vem. Lei de Ohm no ensaio e resistência específica na tensão de uso, a mesma do exercício 13.2.

Resolução

1. **Corrente no ensaio.** I = 1 000 / 5,0×10⁶ = 0,00020 A = 0,20 mA.
2. **Ω/V em serviço.** r = 5,0×10⁶ / 400 = 12 500 Ω/V, muito acima de 100 Ω/V. Passa com folga.

Resposta. I_ensaio = 0,20 mA; 12 500 Ω/V em 400 V, passa com folga.

Interpretação. Cinco megaohms é um isolamento saudável, duas ordens acima do piso de 40 kΩ. O ensaio a 1 000 V não substitui o monitor em uso, mas confirma que o isolamento de fábrica está inteiro.

Erro comum a evitar. Dividir 5 MΩ por 1 000 V e declarar 5 000 Ω/V como critério de serviço, ou usar 5 kΩ no lugar de 5 MΩ.

13.29. Queda no bonding em um ensaio de 100 A (Desafio)

Enunciado. Em um ensaio ilustrativo de continuidade da ligação à massa, passam-se 100 A por um trecho de 10 mΩ. Qual é a queda de tensão? Se o critério ilustrativo for no máximo 2,0 V, o trecho passa?

Conceito. A continuidade do bonding se verifica com corrente alta o bastante para expor uma má crimpagem que um ohmímetro de bancada poderia mascarar. A queda é outra vez V = R I.

Fórmula. `V = R I`

De onde vem. Lei de Ohm no condutor de massas, como no exercício 13.13, agora com um valor de ensaio e um teto ilustrativo de 2 V.

Resolução

1. **Queda.** V = 0,010 × 100 = 1,0 V.
2. **Critério.** 1,0 V é menor do que 2,0 V, então o trecho passa neste critério ilustrativo.

Resposta. V = 1,0 V, abaixo do teto ilustrativo de 2,0 V; o trecho passa.

Interpretação. Um volt em 100 A confirma que os 10 mΩ estão contínuos. Se a crimpagem abrir, a queda sobe e o ensaio falha antes de o veículo ir para a rua com um bonding precário.

Erro comum a evitar. Usar 10 Ω no lugar de 10 mΩ, o que daria 1 000 V, ou comparar a resistência com 2 Ω no lugar de comparar a queda com 2 V.

13.30. Bonding aberto e toque direto no polo (Desafio)

Enunciado. O pior caso ilustrativo: a ligação à massa está aberta e uma pessoa de 1 000 Ω toca a carroceria e um polo do pacote de 400 V, sem o isolamento em série do exercício 13.6. Qual é a corrente no corpo? Compare com os 9,76 mA daquele exercício.

Conceito. Sem bonding e sem isolamento no caminho, a tensão plena do pacote aparece sobre a resistência do corpo. A corrente é V / R_corpo, duas ordens acima do toque com o isolamento no mínimo.

Fórmula. `I = V / R_corpo`

De onde vem. Lei de Ohm no caminho direto polo-corpo-carroceria, que é o cenário que o isolamento, o bonding e o interlock existem para impedir.

Resolução

1. **Corrente.** I = 400 / 1 000 = 0,40 A = 400 mA.
2. **Comparar.** 400 / 9,76 ≈ 41 vezes a corrente do exercício 13.6, em que o isolamento de 40 kΩ estava em série.

Resposta. I = 400 mA, cerca de 41 vezes os 9,76 mA do toque com isolamento no mínimo.

Interpretação. Quatrocentos miliamperes no corpo é uma corrente potencialmente letal. Este exercício fecha a disciplina: isolamento, bonding, descarga, interlock e procedimento de serviço não são formalidades, são o que impede este caminho de se fechar.

Erro comum a evitar. Reaplicar o divisor do exercício 13.6 com 40 kΩ, ou tratar 400 mA como se fosse da mesma ordem de 10 mA.

Máquinas Elétricas para VE/VH (20 h)

14.1. Torque na rotação de base (Básico)

Enunciado. Um motor de tração de exemplo tem 80 kW e rotação de base 8 000 rpm. Qual é o torque nessa rotação, se ela for também o início da região de potência constante?

Conceito. A potência mecânica é o produto do torque pela velocidade angular. Na rotação de base, que marca o fim do torque constante e o início da potência constante, esse torque é o torque nominal de envelope.

Fórmula. $\tau = P / \omega, \ \omega = 2 \pi n / 60$

De onde vem. Vem da definição de potência em um eixo rotativo, $P = \tau \omega$. A rotação em rpm vira rad/s pelo fator $2\pi/60$.

Resolução

1. **Velocidade angular.** $\omega = 2 \pi \times 8\,000 / 60 = 838$ rad/s.
2. **Torque.** $\tau = 80\,000 / 838 = 95{,}5$ N·m.

Resposta. $\tau = 95{,}5$ N·m a 8 000 rpm.

Interpretação. Cerca de 95 N·m é um torque de eixo típico de uma máquina compacta de 80 kW de alta rotação. Nas rodas, o redutor multiplica esse valor, como no exercício 14.19.

Erro comum a evitar. Usar $\tau = P / n$ com n em rpm, o que daria 10 N·m, ou esquecer de converter 80 kW para 80 000 W.

14.2. Regiões de torque constante e de potência constante (Básico)

Enunciado. O mesmo motor entrega torque constante até 8 000 rpm e potência constante até 12 000 rpm. Qual é o torque a 12 000 rpm e a potência a 4 000 rpm?

Conceito. Abaixo da rotação de base o torque é constante e a potência cresce linearmente com a rotação. Acima da base, a potência fica constante e o torque cai com 1/n, na região de enfraquecimento de campo.

Fórmula. `abaixo da base: P = τ_base ω; acima: τ = P_nom / ω`

De onde vem. É o envelope clássico de uma máquina de tração: torque limitado pela corrente até a base, potência limitada pela tensão e pelo aquecimento depois da base.

Resolução

1. **Torque a 12 000 rpm.** A 12 000 rpm a potência ainda é 80 kW. ω = 2 π × 12 000 / 60 = 1 257 rad/s. τ = 80 000 / 1 257 = 63,7 N·m.
2. **Potência a 4 000 rpm.** A 4 000 rpm o motor ainda está em torque constante de 95,5 N·m. P = 95,5 × 2 π × 4 000 / 60 = 40,0 kW.

Resposta. A 12 000 rpm, τ = 63,7 N·m. A 4 000 rpm, P = 40,0 kW.

Interpretação. Na base a potência é metade da nominal quando a rotação é metade (4 000 rpm). Acima da base o torque cai na razão 8 000/12 000, de 95,5 para 63,7 N·m.

Erro comum a evitar. Usar 95,5 N·m também a 12 000 rpm, o que daria 120 kW, acima da potência nominal, ou achar que a 4 000 rpm a potência já é 80 kW.

14.3. Perdas e rendimento (Básico)

Enunciado. Em um ponto de 80 kW na árvore, as perdas Joule são 3 I² R com I = 120 A e R = 0,025 Ω por fase. As perdas no ferro e mecânicas somam 800 W (dados de exemplo). Qual é o rendimento?

Conceito. O rendimento no eixo é a potência mecânica dividida pela potência elétrica de entrada, que é a mecânica mais todas as perdas. As perdas Joule trifásicas são 3 I² R; as de ferro e mecânicas entram como um termo à parte.

Fórmula. `P_cu = 3 I² R, η = P_eixo / (P_eixo + P_cu + P_fe)`

De onde vem. É o balanço de potência da máquina: a entrada alimenta o eixo e as perdas. O 3 em P_cu vale para três fases com a mesma corrente eficaz.

Resolução

1. **Perdas Joule.** P_cu = 3 × 120² × 0,025 = 3 × 14 400 × 0,025 = 1 080 W = 1,08 kW.
2. **Rendimento.** P_perda = 1,08 + 0,80 = 1,88 kW. η = 80 / (80 + 1,88) = 0,977 = 97,7 %.

Resposta. P_cu = 1,08 kW; η = 97,7 %.

Interpretação. Quase 98 % neste ponto é um rendimento alto, típico de uma máquina de tração bem dimensionada no regime nominal. Fora deste ponto as perdas de ferro e o cobre mudam, e o rendimento cai.

Erro comum a evitar. Calcular I² R de uma fase só (360 W) e declarar 99,5 %, ou somar as perdas à potência de entrada no lugar de somá-las ao eixo para achar a entrada.

14.4. Da rotação em rpm para rad/s (Básico)

Enunciado. Confira a conversão usada no exercício 14.1: qual é a velocidade angular, em rad/s, correspondente a 8 000 rpm? E a 12 000 rpm?

Conceito. A unidade SI da velocidade de rotação é o radiano por segundo. O fator 2π/60 converte revoluções por minuto em rad/s, porque cada volta é 2π rad e cada minuto tem 60 s.

Fórmula. `ω = 2 π n / 60`

De onde vem. É a mudança de unidade entre a rotação de catálogo (rpm) e a velocidade angular da fórmula P = τ ω.

Resolução

1. **A 8 000 rpm.** ω = 2 π × 8 000 / 60 = 838 rad/s.
2. **A 12 000 rpm.** ω = 2 π × 12 000 / 60 = 1 257 rad/s, que é 1,5 vezes 838, como a razão 12 000/8 000.

Resposta. 8 000 rpm = 838 rad/s; 12 000 rpm = 1 257 rad/s.

Interpretação. Vale a pena gravar a ordem: 1 000 rpm ≈ 105 rad/s, 8 000 rpm ≈ 838 rad/s. Erros de conversão aparecem logo no torque.

Erro comum a evitar. Usar ω = n / 60 (133 rad/s a 8 000 rpm), esquecendo o 2π, ou usar 2π n / 3600.

14.5. Potência abaixo da rotação de base (Básico)

Enunciado. Com o torque de base de 95,5 N·m do exercício 14.1, qual é a potência no eixo a 6 000 rpm, ainda na região de torque constante?

Conceito. Enquanto o torque é constante, a potência cresce na proporção da rotação: P = τ ω. A 6 000 rpm, que é 75 % da base, a potência é 75 % de 80 kW.

Fórmula. `P = τ_base ω`

De onde vem. É a definição de potência no eixo, com o torque preso ao valor de base enquanto n ≤ n_base.

Resolução

1. **Velocidade.** ω = 2 π × 6 000 / 60 = 628 rad/s.
2. **Potência.** P = 95,5 × 628 = 60 000 W = 60,0 kW, ou 80 × 6 000/8 000 = 60,0 kW.

Resposta. P = 60,0 kW a 6 000 rpm.

Interpretação. A proporção direta com a rotação só vale abaixo da base. Acima dela a potência não passa de 80 kW, e o torque é que cai.

Erro comum a evitar. Declarar 80 kW também a 6 000 rpm, ou calcular P = 95,5 × 6 000 em rpm, sem passar por rad/s.

14.6. Constante de torque a partir da corrente (Básico)

Enunciado. No ponto do exercício 14.1, o torque de 95,5 N·m é obtido com 120 A de corrente de fase (dado de exemplo). Qual é a constante de torque k_t = τ / I? Se um pico de 180 A for admissível por curto tempo, qual torque resulta, na mesma proporcionalidade?

Conceito. Na região linear, o torque de uma máquina síncrona de ímãs (em eixos d-q alinhados) é proporcional à corrente de eixo q. A constante k_t resume essa proporcionalidade para um ponto de catálogo.

Fórmula. `k_t = τ / I, τ = k_t I`

De onde vem. É a definição operacional de constante de torque: razão entre o torque e a corrente que o produz, no alinhamento de MTPA deste exemplo.

Resolução

1. **Constante.** k_t = 95,5 / 120 = 0,796 N·m/A.
2. **Pico.** τ_pico = 0,796 × 180 = 143 N·m.

Resposta. k_t = 0,796 N·m/A; no pico de 180 A, τ = 143 N·m.

Interpretação. O pico de 143 N·m ajuda em arrancadas curtas, mas não é contínuo: o cobre e o inversor aquecem com I^2. O envelope térmico continua em 95,5 N·m.

Erro comum a evitar. Usar k_t = τ × I, ou aplicar os 180 A como se fossem contínuos sem olhar o aquecimento.

14.7. Frequência elétrica e número de polos (Básico)

Enunciado. A máquina do exercício 14.1 tem 8 polos (4 pares) e gira a 8 000 rpm. Qual é a frequência elétrica da alimentação?

Conceito. A frequência elétrica e a rotação mecânica se ligam pelo número de pares de polos: f = n p / 120, com n em rpm e p o número de polos (ou f = n p_pares / 60).

Fórmula. `f = n p / 120`

De onde vem. Uma volta mecânica percorre p/2 ciclos elétricos (p polos = p/2 pares). Em um segundo há n/60 voltas, logo f = (n/60) × (p/2) = n p / 120.

Resolução

1. **Aplicar a fórmula.** f = 8 000 × 8 / 120 = 64 000 / 120 = 533 Hz.

Resposta. f = 533 Hz a 8 000 rpm, com 8 polos.

Interpretação. Quinhentos hertz já é uma frequência alta para o ferro e para o inversor: perda por comutação e perda no ferro crescem com f. Por isso o aço e a frequência de PWM precisam acompanhar a rotação de base.

Erro comum a evitar. Usar f = n / 60 = 133 Hz, esquecendo os polos, ou trocar polos com pares de polos e dobrar ou dividir o resultado.

14.8. Rendimento em um ponto parcial (Básico)

Enunciado. Em um ponto de 50 kW no eixo, as perdas totais (Joule, ferro e mecânicas) somam 2,0 kW (dados de exemplo). Qual é o rendimento neste ponto?

Conceito. O rendimento é sempre potência de eixo sobre potência de entrada, e a entrada é eixo mais perdas. Fora do ponto nominal as perdas não caem na mesma proporção da potência, então o rendimento costuma piorar em carga parcial se as perdas fixas pesarem.

Fórmula. `η = P_eixo / (P_eixo + P_perda)`

De onde vem. É o mesmo balanço do exercício 14.3, agora com perdas já somadas em um ponto parcial.

Resolução

1. **Entrada e rendimento.** P_in = 50 + 2,0 = 52,0 kW. η = 50 / 52,0 = 0,962 = 96,2 %.

Resposta. η = 96,2 % neste ponto de 50 kW.

Interpretação. O rendimento ainda é alto, mas já é menor do que os 97,7 % do ponto nominal de 80 kW com 1,88 kW de perdas. Perdas quase constantes prejudicam a carga parcial.

Erro comum a evitar. Calcular 50 / 2,0 = 25, como se o rendimento fosse potência sobre perdas, ou usar 50 / 48.

14.9. Força contraeletromotriz proporcional à rotação (Básico)

Enunciado. Adote uma constante de tensão de exemplo k_e = 0,179 V / (rad/s), por fase, de modo que a 8 000 rpm a fem de fase seja cerca de 150 V. Qual é a fem a 8 000 rpm e a 12 000 rpm, se k_e permanecer constante (sem saturação)?

Conceito. A fem de uma máquina síncrona de ímãs cresce com a rotação: E = k_e ω. Acima da base o inversor precisa enfraquecer o campo para que E não ultrapasse a tensão disponível no elo.

Fórmula. `E = k_e ω`

De onde vem. É a lei da indução no modelo de fasor: o fluxo dos ímãs, girando, induz uma tensão proporcional à velocidade angular.

Resolução

1. **A 8 000 rpm.** ω = 838 rad/s. E = 0,179 × 838 = 150 V.
2. **A 12 000 rpm.** ω = 1 257 rad/s. E = 0,179 × 1 257 = 225 V, 1,5 vezes a fem da base.

Resposta. E = 150 V a 8 000 rpm e 225 V a 12 000 rpm, por fase, neste k_e de exemplo.

Interpretação. Se o inversor só consegue impor da ordem de 150 V de fase, a 12 000 rpm a fem já seria maior e seria preciso corrente de eixo d (enfraquecimento) para reduzir o fluxo efetivo.

Erro comum a evitar. Multiplicar k_e pela rotação em rpm (1 432 V), ou achar que a fem permanece 150 V acima da base.

14.10. Densidade de corrente no enrolamento (Básico)

Enunciado. A corrente de fase é 120 A e cada fase tem uma seção de cobre equivalente de 16 mm² (dado de exemplo, já somando os ramos). Qual é a densidade de corrente?

Conceito. A densidade de corrente J = I / S é um indicador térmico do enrolamento. Valores contínuos típicos de máquinas refrigeradas a líquido ficam na casa de alguns A/mm² até a ordem de 10 A/mm², conforme o projeto.

Fórmula. `J = I / S`

De onde vem. É a definição de densidade de corrente, a mesma usada no cabo do exercício 13.8, agora no cobre da máquina.

Resolução

1. **Aplicar a definição.** J = 120 / 16 = 7,5 A/mm².

Resposta. J = 7,5 A/mm².

Interpretação. Sete e meio amperes por milímetro quadrado é um valor contínuo já exigente, compatível com refrigeração líquida. Sem ela, a seção precisaria ser maior ou a corrente contínua, menor.

Erro comum a evitar. Multiplicar 120 × 16, ou usar 16 cm² no lugar de 16 mm².

14.11. Fluxo de ímã a partir do torque (Intermediário)

Enunciado. No modelo trifásico $\tau = 1{,}5\, p\, \psi\, I_q$, o motor entrega 95,5 N·m com I_q = 120 A e 4 pares de polos (8 polos, dados de exemplo, $I_d = 0$). Qual é o fluxo de ímã ψ?

Conceito. No modelo d-q de uma máquina síncrona de ímãs, com corrente só no eixo q (MTPA de máquina não relutante), o torque é 1,5 vezes o número de pares de polos vezes o fluxo de ímã vezes I_q.

Fórmula. $\tau = 1{,}5\, p\, \psi\, I_q$, $\psi = \tau / (1{,}5\, p\, I_q)$

De onde vem. É a expressão padrão do torque eletromagnético em variáveis de Park, com o 1,5 vindo da transformação de potência invariante da máquina trifásica.

Resolução

1. **Isolar o fluxo.** $\psi = 95{,}5 / (1{,}5 \times 4 \times 120) = 95{,}5 / 720 = 0{,}133$ Wb.

Resposta. ψ = 0,133 Wb.

Interpretação. Um fluxo de cerca de 0,13 Wb é compatível com uma máquina compacta de alta rotação. Este ψ, com k_e do exercício 14.9, descreve o mesmo ímã por ângulos diferentes.

Erro comum a evitar. Usar p = 8 (polos) no lugar de 4 pares, o que daria metade do fluxo, ou esquecer o 1,5.

14.12. Rotação máxima para um torque mínimo (Intermediário)

Enunciado. Na região de potência constante de 80 kW, o projeto pede pelo menos 30 N·m no eixo (dado de exemplo). Qual é a maior rotação em que esse torque ainda é possível?

Conceito. Acima da base, $\tau = P / \omega$. O torque mínimo de projeto fixa a rotação máxima: $\omega_{máx} = P / \tau_{mín}$. É o canto superior direito do envelope.

Fórmula. $n_{máx} = 60\ P / (2\ \pi\ \tau_{mín})$

De onde vem. Isola-se n na definição $P = \tau\ \omega$, com $\omega = 2\ \pi\ n / 60$, usando o menor torque ainda aceitável na potência nominal.

Resolução

1. **Velocidade angular.** $\omega = 80\,000 / 30 = 2\,667$ rad/s.
2. **Rotação.** $n = 2\,667 \times 60 / (2\ \pi) = 25\,465$ rpm, cerca de 25 500 rpm.

Resposta. $n_{máx} \approx 25\,500$ rpm, para 30 N·m a 80 kW.

Interpretação. Vinte e cinco mil rpm é muito acima dos 12 000 rpm do exercício 14.2: o envelope de 80 kW ainda cabe em 30 N·m, mas rolamentos, equilíbrio e perda no ferro podem não aguentar. A rotação máxima costuma ser mecânica, não só elétrica.

Erro comum a evitar. Calcular n = 80 / 30 em kW e N·m sem as unidades SI, ou usar 12 000 rpm como se já fosse a resposta.

14.13. Escorregamento e perdas no rotor de uma máquina de indução (Intermediário)

Enunciado. Uma máquina de indução de exemplo entrega 80 kW no eixo a 7 840 rpm, com sincronismo em 8 000 rpm. Qual é o escorregamento? Qual é a potência de entreferro e a perda Joule no rotor, no modelo clássico?

Conceito. O escorregamento é $s = (n_s - n)/n_s$. No modelo clássico, a perda Joule no rotor é s vezes a potência que atravessa o entreferro, e a potência no eixo é $(1 - s)$ vezes essa potência de entreferro (desprezando perdas mecânicas).

Fórmula. $s = (n_s - n) / n_s,\ P_{ag} = P_{eixo} / (1 - s),\ P_{cu,r} = s\ P_{ag}$

De onde vem. É o balanço do circuito equivalente da máquina de indução: a parcela s da potência de entreferro vira calor no rotor, e o restante vira trabalho no eixo.

Resolução

1. **Escorregamento.** $s = (8\,000 - 7\,840) / 8\,000 = 0{,}020 = 2{,}0\ \%$.
2. **Entreferro e cobre do rotor.** $P_{ag} = 80 / 0{,}98 = 81{,}63$ kW. $P_{cu,r} = 0{,}020 \times 81{,}63 = 1{,}63$ kW.

Resposta. s = 2,0 %; $P_{ag} = 81{,}63$ kW; $P_{cu,r} = 1{,}63$ kW.

Interpretação. Dois por cento de escorregamento em 80 kW já são 1,63 kW só no cobre do rotor, da ordem das perdas Joule do estator do exercício 14.3. Por isso o rendimento de uma de indução costuma ficar um pouco abaixo de uma síncrona de ímãs no mesmo porte.

Erro comum a evitar. Calcular s = 160/7 840, ou achar que a perda no rotor é s × 80 kW = 1,60 kW sem passar pelo entreferro (o erro é pequeno, mas a ordem das operações importa no método).

14.14. Energia cinética do rotor (Intermediário)

Enunciado. O rotor da máquina de 80 kW tem inércia de exemplo J = 0,030 kg·m². Qual é a energia cinética armazenada a 8 000 rpm? E a 12 000 rpm?

Conceito. A energia de rotação é ½ J ω². Ela entra no tempo de aceleração da máquina, no dimensionamento do inversor em rampas e na segurança de um rotor que solta à alta rotação.

Fórmula. $E = \tfrac{1}{2} J \omega^2$

De onde vem. É a energia cinética de um corpo rígido em rotação, com ω em rad/s e J no eixo da máquina.

Resolução

1. **A 8 000 rpm.** ω = 838 rad/s. E = 0,5 × 0,030 × 838² = 10 530 J = 10,5 kJ.
2. **A 12 000 rpm.** A energia vai com o quadrado da rotação: E = 10,5 × (12/8)² = 10,5 × 2,25 = 23,7 kJ.

Resposta. E = 10,5 kJ a 8 000 rpm e 23,7 kJ a 12 000 rpm.

Interpretação. Dez a vinte e quatro quilojoules são pouca energia diante dos 32 kWh da bateria, mas são um pulso relevante para o eixo e para o inversor se a máquina precisar parar depressa, ou para um burst de aceleração.

Erro comum a evitar. Usar ω em rpm dentro de ½ J ω², ou esquecer o ½.

14.15. Potência aparente e fator de potência (Intermediário)

Enunciado. O motor entrega 80 kW no eixo com rendimento 97,7 % (exercício 14.3). A tensão de fase é 247 V e a corrente é 120 A (valores de exemplo, compatíveis com essa potência). Qual é a potência aparente trifásica, o fator de potência e a potência reativa?

Conceito. A potência elétrica ativa de entrada é P_eixo / η. A aparente é S = 3 V_fase I_fase. O fator de potência é P/S, e Q = √(S² − P²) no convencionado reativo.

Fórmula. $S = 3 V I,\ fp = P / S,\ Q = \sqrt{S^2 - P^2}$

De onde vem. São as definições de potência em um sistema trifásico equilibrado, com V e I de fase (ligação em estrela de exemplo).

Resolução

1. **Potência ativa de entrada.** P = 80 / 0,977 = 81,88 kW, como no exercício 14.3.
2. **S, fp e Q.** S = 3 × 247 × 120 / 1 000 = 89,0 kVA. fp = 81,88 / 89,0 = 0,920. Q = √(89,0² − 81,88²) = 35,0 kvar.

Resposta. S = 89,0 kVA; fp = 0,920; Q = 35,0 kvar.

Interpretação. O fator 0,92 é razoável para um ponto de carga alta. O inversor precisa fornecer esses 35 kvar, o que entra na corrente do elo e na solicitação dos semicondutores, não só nos 80 kW do eixo.

Erro comum a evitar. Calcular S = V I com uma fase só, ou usar 80 kW no lugar da entrada de 81,88 kW para o fator de potência.

14.16. Relação do redutor até a roda (Intermediário)

Enunciado. A 100 km/h, com raio de roda de 0,30 m (valor de exemplo), qual é a rotação da roda? Se o motor gira a 8 000 rpm nesse cruzeiro, qual é a relação de redução n_motor / n_roda?

Conceito. A velocidade do veículo e o raio da roda fixam a rotação da roda: v = ω_roda r, com v em m/s. A relação do redutor é a razão entre a rotação do motor e a da roda, no mesmo instante, desprezando o escorregamento do pneu.

Fórmula. `ω_roda = v / r, i = n_motor / n_roda`

De onde vem. Vem da cinemática de rolamento puro e da definição de relação de transmissão em um redutor de um estágio equivalente.

Resolução

1. **Rotação da roda.** v = 100 / 3,6 = 27,78 m/s. ω_roda = 27,78 / 0,30 = 92,6 rad/s = 884 rpm.
2. **Relação.** i = 8 000 / 884 = 9,05.

Resposta. A roda gira a 884 rpm; a relação é i = 9,05.

Interpretação. Uma redução da ordem de 9 é típica de um eixo elétrico de alta rotação. Ela multiplica o torque do exercício 14.1 e reduz a rotação ao que o pneu comporta.

Erro comum a evitar. Usar v em km/h dentro de v/r, ou inverter a relação (884/8 000).

14.17. Torque na roda com o redutor (Intermediário)

Enunciado. Com i = 9,05 do exercício 14.16, torque de eixo de 95,5 N·m e rendimento do redutor de 0,97 (dado de exemplo), qual é o torque nas rodas? Qual é a força longitudinal com raio 0,30 m?

Conceito. O redutor multiplica o torque e o rendimento reduz um pouco o que chega à roda: τ_roda = τ_eixo i η. A força no contato é esse torque dividido pelo raio.

Fórmula. `τ_roda = τ_eixo i η, F = τ_roda / r`

De onde vem. É o balanço de potência e de cinemática do redutor: a potência na roda é η vezes a do eixo, e ω cai com i, então o torque sobe com i η.

Resolução

1. **Torque na roda.** τ_roda = 95,5 × 9,05 × 0,97 = 838 N·m.
2. **Força.** F = 838 / 0,30 = 2 794 N.

Resposta. τ_roda = 838 N·m; F = 2 794 N.

Interpretação. Quase 2,8 kN no contato, em um up! de 900 kg, dão cerca de 3,1 m/s² de aceleração se se desprezar resistências — um arranque vigoroso neste envelope contínuo. O pico do exercício 14.6 ainda sobe isso.

Erro comum a evitar. Multiplicar pelo i esquecendo o rendimento, ou dividir o torque do eixo pelo raio sem passar pelo redutor.

14.18. Potência recuperada na regeneração (Intermediário)

Enunciado. Em uma descida, o eixo entrega 40 kW de potência mecânica para a máquina, que opera como gerador com rendimento 0,95 (dado de exemplo, já incluindo inversor). Qual potência entra na bateria? Qual é a perda nessa cadeia?

Conceito. Na regeneração o fluxo se inverte: a potência na bateria é a mecânica vezes o rendimento da cadeia no sentido roda-bateria. A perda é a diferença.

Fórmula. $P_{bat} = \eta\, P_{mec},\ P_{perda} = (1 - \eta)\, P_{mec}$

De onde vem. É a definição de rendimento no sentido de recuperação. O valor 0,95 é um ponto de exemplo, mais alto do que o 0,65 global roda-bateria de outros exercícios, porque aqui já se parte do eixo da máquina.

Resolução

1. **Na bateria e perda.** P_bat = 0,95 × 40 = 38,0 kW. P_perda = 2,0 kW.

Resposta. P_bat = 38,0 kW; perda = 2,0 kW.

Interpretação. Quase toda a potência de uma descida de 40 kW pode voltar para a bateria, se a bateria aceitar essa taxa de carga. O limite costuma ser a bateria ou a aderência, não a máquina em si.

Erro comum a evitar. Dividir 40 / 0,95, como na motorização, ou esquecer que a perda é 5 % de 40 kW e não de 38 kW.

14.19. Torque a 10 000 rpm, já em potência constante (Intermediário)

Enunciado. No envelope do exercício 14.2, a potência é 80 kW entre 8 000 e 12 000 rpm. Qual é o torque a 10 000 rpm?

Conceito. Entre a base e a rotação máxima, a potência fica constante e o torque cai com 1/n. A 10 000 rpm o ponto ainda está nessa região.

Fórmula. $\tau = P / \omega$

De onde vem. É a mesma definição do exercício 14.1, agora em um ponto acima da base, com P preso a 80 kW.

Resolução

1. **Velocidade e torque.** ω = 2 π × 10 000 / 60 = 1 047 rad/s. τ = 80 000 / 1 047 = 76,4 N·m.

Resposta. τ = 76,4 N·m a 10 000 rpm.

Interpretação. O torque caiu de 95,5 N·m na base para 76,4 N·m a 10 000 rpm, na razão 8 000/10 000. É o meio do caminho entre 95,5 e os 63,7 N·m a 12 000 rpm.

Erro comum a evitar. Manter 95,5 N·m a 10 000 rpm, ou interpolar linearmente o torque entre 8 000 e 12 000 rpm (o certo é interpolar com 1/n).

14.20. Aquecimento do cobre em regime contínuo (Intermediário)

Enunciado. As perdas Joule do exercício 14.3 são 1,08 kW. Se a resistência térmica equivalente do enrolamento à água de refrigeração for 0,080 K/W (valor de exemplo), qual é a elevação de temperatura do cobre em regime permanente?

Conceito. Em regime permanente, o calor que o cobre gera atravessa a resistência térmica até o fluido: ΔT = R_th P_cu. É um modelo de um único nó, suficiente para a ordem de grandeza.

Fórmula. `ΔT = R_th P_cu`

De onde vem. É a analogia elétrica do calor em regime estacionário: temperatura está para tensão assim como potência está para corrente, e R_th é a resistência térmica.

Resolução

1. **Elevação.** ΔT = 0,080 × 1 080 = 86,4 K.

Resposta. ΔT = 86,4 K.

Interpretação. Oitenta e seis kelvin de elevação, partindo de uma água a 70 °C, já colocam o cobre perto de 156 °C, típico de uma classe térmica exigente. A R_th e a vazão de água são dados de projeto tão importantes quanto o cobre em si.

Erro comum a evitar. Usar 1,08 kW como 1,08 W, o que daria 0,086 K, ou inverter a fórmula (P / R_th).

14.21. Corrente para um torque de pico de 180 N·m (Desafio)

Enunciado. Com a constante k_t = 0,796 N·m/A do exercício 14.6, qual corrente de fase pede um torque de pico de 180 N·m, na mesma proporcionalidade? Compare com os 120 A do contínuo.

Conceito. Na região linear, I = τ / k_t. O pico de torque define a corrente de pico do inversor e da máquina, que só pode ser sustentada por pouco tempo.

Fórmula. `I = τ / k_t`

De onde vem. É a inversão da definição de k_t do exercício 14.6.

Resolução

1. **Corrente de pico.** I = 180 / 0,796 = 226 A, cerca de 1,88 vezes os 120 A contínuos.

Resposta. I = 226 A, 1,88 vezes a corrente contínua de 120 A.

Interpretação. O inversor e o cobre precisam de folga de pico da ordem de 90 % acima do contínuo, neste exemplo, para entregar 180 N·m. Essa folga é curta e térmica, não um novo regime nominal.

Erro comum a evitar. Usar 180 / 120 = 1,5 A, ou aplicar k_t sobre 95,5 N·m outra vez.

14.22. Rotação limite da fem, sem enfraquecimento (Desafio)

Enunciado. Com k_e = 0,179 V/(rad/s) do exercício 14.9, o inversor consegue no máximo 200 V de fase (valor de exemplo). Qual é a maior rotação em que a fem ainda cabe nessa tensão, sem enfraquecimento de campo?

Conceito. Sem corrente de eixo d, a fem E = k_e ω não pode ultrapassar a tensão que o inversor impõe. ω_máx = V / k_e é o teto da região de torque constante do lado da tensão, que no projeto bem feito coincide com a rotação de base.

Fórmula. `ω_máx = V / k_e, n_máx = 60 ω_máx / (2 π)`

De onde vem. É o limite de tensão do modelo de fasor, com E = k_e ω ≤ V, desprezando a queda ôhmica e a reatância neste exercício.

Resolução

1. **Velocidade e rotação.** ω = 200 / 0,179 = 1 117 rad/s. n = 1 117 × 60 / (2 π) = 10 670 rpm.

Resposta. n_máx ≈ 10 670 rpm, sem enfraquecimento, nesta tensão de 200 V.

Interpretação. Acima de cerca de 10 700 rpm, com 200 V, já seria preciso enfraquecer o campo para continuar acelerando. Com a fem de 150 V a 8 000 rpm do exercício 14.9 havia folga; a 12 000 rpm, 225 V já passaria deste teto de 200 V.

Erro comum a evitar. Calcular n = 200 / 0,179 em rpm, ou usar a tensão do elo de 400 V como se fosse a de fase.

14.23. Rendimento em 40 kW com as mesmas perdas (Desafio)

Enunciado. Se as perdas totais permanecessem 1,88 kW do exercício 14.3 também em um ponto de 40 kW no eixo, qual seria o rendimento? Compare com os 97,7 % a 80 kW.

Conceito. Se as perdas fossem constantes, o rendimento cairia em carga parcial porque o denominador não cai na mesma proporção. Na prática parte das perdas (Joule) cai com I² e parte (ferro, mecânica) permanece, então este cálculo é um piso pessimista.

Fórmula. `η = P / (P + P_perda)`

De onde vem. É o mesmo balanço do exercício 14.3, com P mudando e P_perda presa, de propósito, para isolar o efeito da carga parcial.

Resolução

1. **Rendimento.** η = 40 / (40 + 1,88) = 40 / 41,88 = 0,955 = 95,5 %, contra 97,7 % a 80 kW.

Resposta. η = 95,5 % a 40 kW, se as perdas ficassem em 1,88 kW.

Interpretação. A queda de 97,7 % para 95,5 % já é visível, embora ainda alta. Se as perdas Joule caíssem com a carga, o rendimento parcial melhoraria um pouco em relação a este piso.

Erro comum a evitar. Manter 97,7 % porque as perdas não mudaram na mesma conta, ou calcular 40 / 1,88.

14.24. Tempo de arranque ideal até 50 km/h (Desafio)

Enunciado. Com a força no contato de 2 794 N do exercício 14.17 e m = 900 kg, desprezando resistências, em quanto tempo o up! chega a 50 km/h, partindo do repouso, se essa força for constante?

Conceito. Com força constante, a aceleração é F/m e o tempo é v/a. O modelo ignora aerodinâmica, rolamento e a queda de torque com a rotação, e serve como teto de desempenho no envelope contínuo.

Fórmula. `a = F / m, t = v / a`

De onde vem. É a segunda lei de Newton com força constante, e a cinemática do movimento uniformemente acelerado a partir do repouso.

Resolução

1. **Aceleração.** a = 2 794 / 900 = 3,10 m/s².
2. **Tempo.** v = 50 / 3,6 = 13,89 m/s. t = 13,89 / 3,10 = 4,47 s.

Resposta. a = 3,10 m/s²; t = 4,47 s até 50 km/h, neste modelo sem resistências.

Interpretação. Quatro segundos e meio até 50 km/h, só com o torque contínuo, já é um arranque forte para um hatch de 900 kg. Com o pico de 143 N·m do exercício 14.6 o tempo cairia ainda mais, até o limite de aderência.

Erro comum a evitar. Usar 50 m/s no lugar de 50 km/h, ou esquecer de converter a força em aceleração.

14.25. Derating contínuo com a temperatura do cobre (Desafio)

Enunciado. A corrente contínua admissível cai de 120 A para 100 A por derating térmico (dado de exemplo). Com k_t = 0,796 N·m/A e rotação de base de 8 000 rpm, qual é a nova potência contínua?

Conceito. Se o torque é proporcional à corrente e a rotação de base se mantém, a potência contínua cai na mesma proporção da corrente admissível. O derating térmico reduz o envelope contínuo, não necessariamente o pico de poucos segundos.

Fórmula. `τ = k_t I, P = τ ω`

De onde vem. É a cadeia k_t do exercício 14.6 com P = τ ω do exercício 14.1, usando a corrente já deratada.

Resolução

1. **Torque e potência deratados.** τ = 0,796 × 100 = 79,6 N·m. P = 79,6 × 838 = 66 700 W = 66,7 kW, que é 100/120 do valor de 80 kW.

Resposta. P_cont = 66,7 kW a 8 000 rpm, com 100 A contínuos.

Interpretação. Um derating de 120 A para 100 A corta 13 kW do eixo contínuo. O motor de 80 kW no papel pode ser um motor de 67 kW em um dia quente, se a água ou o cobre subirem demais.

Erro comum a evitar. Manter 80 kW porque a rotação de base não mudou, ou aplicar o fator 100/120 sobre a rotação no lugar da corrente.

14.26. Potência do eixo a partir da força na roda a 100 km/h (Desafio)

Enunciado. Com a força de 2 794 N do exercício 14.17, em 100 km/h, qual seria a potência nas rodas se essa força pudesse ser mantida? Cabe nos 80 kW nominais da máquina, depois do redutor de rendimento 0,97?

Conceito. A potência na roda é F v. A potência no eixo da máquina é a da roda dividida pelo rendimento do redutor. Este cálculo mostra que o torque contínuo de base, a 100 km/h com i = 9,05, ocupa o canto do envelope.

Fórmula. `P_roda = F v, P_eixo = P_roda / η`

De onde vem. Potência é força vezes velocidade no contato, e o redutor transfere essa potência com rendimento η. O envelope de 80 kW limita o que o eixo pode entregar.

Resolução

1. **Potência na roda.** v = 100 / 3,6 = 27,78 m/s. P_roda = 2 794 × 27,78 = 77 600 W = 77,6 kW.
2. **No eixo e comparação.** P_eixo = 77,6 / 0,97 = 80,0 kW, exatamente o nominal. A 8 000 rpm e i = 9,05, este é o cruzeiro do exercício 14.16: o envelope está no canto (95,5 N·m e 80 kW ao mesmo tempo).

Resposta. P_roda = 77,6 kW; P_eixo = 80,0 kW, no limite do envelope nominal.

Interpretação. O cruzeiro a 100 km/h com o torque de base e i = 9,05 cai exatamente no canto do envelope: 8 000 rpm e 80 kW. Não há folga de potência para subir uma rampa nessa rotação, a menos que se use o pico ou se reduza a velocidade.

Erro comum a evitar. Calcular F × 100 km/h sem converter para m/s, ou esquecer de dividir pelo rendimento do redutor.

14.27. Perda Joule no pico de 226 A (Desafio)

Enunciado. Com R = 0,025 Ω por fase do exercício 14.3 e a corrente de pico de 226 A do exercício 14.21, qual é a perda Joule trifásica nesse pico? Quantas vezes ela supera os 1,08 kW do contínuo?

Conceito. A perda Joule vai com o quadrado da corrente. O dobro da corrente, se fosse o caso, quadruplicaria o calor; aqui a razão 226/120 já quase multiplica P_cu por 3,5.

Fórmula. `P_cu = 3 I² R`

De onde vem. É a mesma expressão do exercício 14.3, avaliada no ponto de pico.

Resolução

1. **Perda no pico.** P_cu = 3 × 226² × 0,025 = 3 × 51 076 × 0,025 = 3 831 W = 3,83 kW.
2. **Razão.** 3,83 / 1,08 = 3,55, que é (226/120)².

Resposta. P_cu = 3,83 kW no pico, 3,55 vezes os 1,08 kW contínuos.

Interpretação. Quase 4 kW só no cobre, por poucos segundos, explicam por que o pico é curto: a constante térmica do enrolamento aguenta o pulso, mas o contínuo não. O inversor e a água precisam estar preparados para esse pulso.

Erro comum a evitar. Escalar 1,08 kW por 226/120 no lugar de (226/120)², o que daria só 2,03 kW.

14.28. Comparar perdas de indução e de ímã permanente (Desafio)

Enunciado. Some as perdas do ponto de 80 kW: na máquina de ímã do exercício 14.3, 1,88 kW; na de indução do exercício 14.13, acrescente os 1,63 kW do rotor às mesmas perdas de estator, ferro e mecânicas de 1,88 kW (modelo ilustrativo, estatores iguais). Qual é o rendimento de cada uma?

Conceito. A máquina de indução tem uma perda a mais, a Joule do rotor, da ordem de s P_ag. Se o resto for parecido, o rendimento fica abaixo do da síncrona de ímãs no mesmo ponto.

Fórmula. `η = P / (P + P_perda)`

De onde vem. É o balanço de potência aplicado às duas máquinas, com o termo extra P_cu,r da indução.

Resolução

1. **Ímã permanente.** η_PM = 80 / (80 + 1,88) = 97,7 %, como no exercício 14.3.
2. **Indução.** P_perda = 1,88 + 1,63 = 3,51 kW. η_IM = 80 / 83,51 = 0,958 = 95,8 %.

Resposta. η_PM = 97,7 %; η_IM = 95,8 %, neste modelo ilustrativo.

Interpretação. A diferença de cerca de dois pontos percentuais, neste exemplo, é toda a perda do rotor. Há outras diferenças reais (ferro, ventilação, custo de ímã), mas o escorregamento já explica boa parte da desvantagem da indução no rendimento.

Erro comum a evitar. Somar 1,63 kW também na máquina de ímã, ou usar 1,63 kW como única perda da indução.

14.29. Corrente no elo para 80 kW no eixo (Desafio)

Enunciado. Com η = 97,7 % no exercício 14.3 e um inversor de rendimento 0,97 à frente, alimentado pelo elo de 400 V, qual é a potência e a corrente médias no elo para entregar 80 kW no eixo?

Conceito. As duas eficiências em série multiplicam-se. A potência no elo é P_eixo / (η_mot η_inv), e a corrente média é essa potência dividida pela tensão do elo.

Fórmula. `P_elo = P_eixo / (η_mot η_inv), I_elo = P_elo / V`

De onde vem. É o balanço de potência da cadeia inversor-máquina, com o elo em corrente contínua (P = V I).

Resolução

1. **Potência no elo.** η_cad = 0,977 × 0,97 = 0,948. P_elo = 80 / 0,948 = 84,4 kW.
2. **Corrente.** I_elo = 84 400 / 400 = 211 A.

Resposta. P_elo = 84,4 kW; I_elo = 211 A.

Interpretação. A corrente no elo fica um pouco acima dos 200 A ideais do exercício 13.1, porque agora as perdas da máquina e do inversor entram na conta. Cabos e contatores devem ser dimensionados por esta corrente, não pela mecânica líquida.

Erro comum a evitar. Usar só um dos dois rendimentos, ou calcular 80 000 / 400 = 200 A e encerrar, como se a cadeia fosse ideal.

14.30. Ponto de operação em uma rampa de 5 % a 100 km/h (Desafio)

Enunciado. A rampa de 5 % a 100 km/h pede 12,26 kW extras nas rodas, além dos 11,76 kW no plano (exercício 12.23), total 24,02 kW nas rodas. Com o redutor de rendimento 0,97 e a máquina a 8 000 rpm (cruzeiro do exercício 14.16), qual é a potência e o torque no eixo? Esse ponto cabe no envelope contínuo de 80 kW e 95,5 N·m?

Conceito. A potência no eixo é a das rodas dividida pelo rendimento do redutor. O torque segue de $P = \tau\,\omega$. Comparar com o envelope diz se o cruzeiro em rampa é contínuo ou se pede pico ou redução de velocidade.

Fórmula. `P_eixo = P_roda / η, τ = P_eixo / ω`

De onde vem. É o mesmo balanço dos exercícios 14.17 e 14.26, agora com a potência de rampa já calculada na disciplina de estado da arte.

Resolução

1. **Potência no eixo.** P_eixo = 24,02 / 0,97 = 24,76 kW.
2. **Torque e envelope.** ω = 838 rad/s. τ = 24 760 / 838 = 29,5 N·m, bem abaixo de 95,5 N·m, e 24,76 kW cabe folgado em 80 kW. O cruzeiro em rampa é contínuo.

Resposta. P_eixo = 24,8 kW; τ = 29,5 N·m, ambos dentro do envelope contínuo.

Interpretação. A rampa de 5 % a 100 km/h é pesada para a bateria (exercício 12.23), mas leve para a máquina de 80 kW: o motor está em carga parcial. O gargalo dessa subida é a energia, não o torque.

Erro comum a evitar. Comparar 24,02 kW nas rodas diretamente com 95,5 N·m, misturando potência e torque, ou esquecer o rendimento do redutor.

Baterias de VE/VH (20 h)

15.1. Tensão, capacidade e energia de um pacote (Básico)

Enunciado. Um pacote de exemplo é 96s2p, com células de 3,70 V nominais e 50 Ah. Calcule a tensão nominal, a capacidade, a energia bruta e a energia útil com profundidade de descarga de 90 %.

Conceito. No arranjo série-paralelo, as células em série somam tensão e as em paralelo somam capacidade. A energia bruta é o produto da tensão nominal pela capacidade; a útil desconta a profundidade de descarga que o algoritmo de fato explora.

Fórmula. $V = n_s\, V_{cél},\ Q = n_p\, Q_{cél},\ E = V\, Q,\ E_{útil} = DoD\, E$

De onde vem. Vêm das regras de associação de fontes e da definição de energia de um pacote, E = V Q, com Q em Ah e V em volts (o produto em V·Ah é Wh).

Resolução

1. **Tensão e capacidade.** V = 96 × 3,70 = 355,2 V. Q = 2 × 50 = 100 Ah.
2. **Energia bruta e útil.** E = 355,2 × 100 / 1 000 = 35,52 kWh. E_útil = 0,90 × 35,52 = 31,97 kWh.

Resposta. V = 355,2 V; Q = 100 Ah; E = 35,52 kWh; E_útil = 31,97 kWh.

Interpretação. Este pacote de exemplo fica na casa dos 32 kWh úteis do up! elétrico das outras disciplinas, com um pouco de folga bruta (35,52 kWh) para a janela de 90 % de DoD.

Erro comum a evitar. Somar série e paralelo ao contrário (2 × 3,70 V e 96 × 50 Ah), ou esquecer de dividir V·Ah por 1 000 para chegar a kWh.

15.2. Taxa C e tempo de carga (Básico)

Enunciado. Com o pacote do exercício 15.1, qual é a taxa C ao entregar 80 kW? Quanto tempo leva uma carga de 10 % a 90 % da capacidade com um carregador de 11 kW, desprezando perdas?

Conceito. A taxa C é a potência dividida pela energia do pacote (com P em kW e E em kWh, C tem unidade de 1/h). O tempo de uma janela de carga é a energia dessa janela dividida pela potência do carregador, sem taper e sem perdas neste modelo.

Fórmula. $C = P / E,\ t = (SOC_f - SOC_i)\ E / P_{chg}$

De onde vem. A taxa C compara o pedido instantâneo à capacidade em energia. O tempo de carga é um balanço de energia a potência constante, usando a energia bruta de 35,52 kWh.

Resolução

1. **Taxa C.** C = 80 / 35,52 = 2,25 C.
2. **Tempo de 10 % a 90 %.** Energia da janela = 0,80 × 35,52 = 28,42 kWh. t = 28,42 / 11 = 2,583 h = 2 h 35 min, sem perdas nem taper.

Resposta. 2,25 C a 80 kW; 2 h 35 min para ir de 10 % a 90 % em 11 kW (sem perdas nem taper).

Interpretação. 2,25 C é um pedido forte de descarga, típico de um pico de ultrapassagem, não de um cruzeiro. Já a carga em 11 kW (nível 2) é calma: duas horas e meia para 80 pontos percentuais, neste modelo idealizado.

Erro comum a evitar. Usar os 31,97 kWh úteis no lugar dos 35,52 kWh brutos nesta conta (o enunciado pede a capacidade do pacote), ou esquecer o fator 0,80 da janela 10–90 %.

15.3. Queda ôhmica e calor (Básico)

Enunciado. O pacote tem resistência interna equivalente de 60 mΩ e a tensão de circuito aberto no ponto de operação é 355,2 V (dados de exemplo). A 80 kW, calcule a queda de tensão, a tensão em carga, a perda e o rendimento ôhmico da descarga.

Conceito. A corrente aproximada é P / V_oc (primeiro palpite, sem iterar). A queda é R I, a tensão em carga é V_oc − R I, a perda é $I^2 R$ e o rendimento ôhmico é V_t / V_oc, equivalente a 1 − I R / V_oc neste modelo.

Fórmula. $I = P / V_{oc},\ \Delta V = R\ I,\ V_t = V_{oc} - \Delta V,\ \eta = V_t / V_{oc}$

De onde vem. É o circuito equivalente de Thévenin do pacote: uma fonte V_oc em série com R. A potência de 80 kW é tomada sobre V_oc para obter I neste exercício, como na lista original.

Resolução

1. **Corrente e queda.** I = 80 000 / 355,2 = 225 A. ΔV = 0,060 × 225 = 13,5 V. V_t = 355,2 − 13,5 = 341,7 V.
2. **Perda e rendimento.** $P_{Joule} = 225^2 \times 0{,}060 = 3{,}04$ kW. η_ôhmico = 341,7 / 355,2 = 0,962 = 96,2 %.

Resposta. ΔV = 13,5 V; V_t = 341,7 V; P_Joule = 3,04 kW; η_ôhmico = 96,2 %.

Interpretação. Três quilowatts de calor no pacote, a 80 kW, já pedem gestão térmica. O rendimento ôhmico de 96,2 % é só a parcela da resistência interna; o inversor e a máquina ainda entram depois.

Erro comum a evitar. Usar 60 Ω no lugar de 60 mΩ, o que daria uma queda absurda, ou calcular o rendimento como P / (P + P_Joule) com I = P / V_t, misturando o critério deste exercício.

15.4. Corrente por ramo em paralelo (Básico)

Enunciado. No pacote 96s2p do exercício 15.1, a corrente do pacote a 80 kW é 225 A (exercício 15.3). Qual é a corrente em cada um dos dois ramos em paralelo, se eles se repartem igualmente?

Conceito. Os ramos em paralelo dividem a corrente. Com dois ramos iguais, cada um leva metade da corrente do pacote, e cada célula de um ramo vê essa mesma corrente, porque as 96 células do ramo estão em série.

Fórmula. `I_ramo = I_pacote / n_p`

De onde vem. É a lei dos nós: a corrente do pacote é a soma das correntes dos ramos. Com ramos iguais, a divisão é uniforme.

Resolução

1. **Dividir pelos ramos.** I_ramo = 225 / 2 = 113 A.

Resposta. I_ramo = 113 A em cada ramo, neste rateio igual.

Interpretação. Cada célula vê 113 A, ou cerca de 2,25 C também no nível da célula (113 / 50 Ah). O paralelo não reduz a taxa C da célula, só a corrente que o cabo do pacote precisa levar em cada ramo.

Erro comum a evitar. Dividir também pelas 96 células em série, como se a série repartisse corrente.

15.5. Número de células e energia de cada uma (Básico)

Enunciado. No arranjo 96s2p do exercício 15.1, quantas células há no pacote? Qual é a energia nominal de uma célula de 3,70 V e 50 Ah? Confira que o produto bate com os 35,52 kWh.

Conceito. O número de células é n_s vezes n_p. A energia de uma célula é V_cél Q_cél, e a do pacote é esse valor vezes o número de células, porque série e paralelo só rearranjam a mesma energia.

Fórmula. `N = n_s n_p, E_cél = V_cél Q_cél, E = N E_cél`

De onde vem. É a contagem do arranjo e a definição de energia da célula, a mesma E = V Q do exercício 15.1, agora no nível da peça.

Resolução

1. **Contagem e energia da célula.** N = 96 × 2 = 192 células. E_cél = 3,70 × 50 = 185 Wh = 0,185 kWh.
2. **Conferir o pacote.** E = 192 × 0,185 = 35,52 kWh, igual ao exercício 15.1.

Resposta. 192 células; 185 Wh por célula; 192 × 0,185 = 35,52 kWh, conferido.

Interpretação. A energia não depende de como se agrupa série e paralelo: 192 células de 185 Wh somam sempre 35,52 kWh. O arranjo só escolhe a tensão e a corrente do pacote.

Erro comum a evitar. Contar 96 + 2 = 98 células, ou usar 3,70 × 50 = 185 kWh no lugar de 185 Wh.

15.6. Janela de tensão do pacote (Básico)

Enunciado. Se cada célula opera entre 3,00 V (vazio) e 4,20 V (cheio), valores de exemplo, quais são a tensão mínima e a máxima do pacote 96s2p? A tensão nominal de 355,2 V fica onde nessa janela?

Conceito. A tensão do pacote é sempre 96 vezes a tensão da célula, porque os ramos em paralelo têm a mesma tensão. A janela de trabalho do pacote é a janela da célula, só escalada pela série.

Fórmula. `V_mín = n_s V_mín,cél, V_máx = n_s V_máx,cél`

De onde vem. É a mesma regra de associação em série do exercício 15.1, aplicada aos extremos da célula, não só ao valor nominal.

Resolução

1. **Extremos.** V_mín = 96 × 3,00 = 288 V. V_máx = 96 × 4,20 = 403 V.
2. **O nominal na janela.** 355,2 V está entre 288 V e 403 V, mais perto do cheio do que do vazio (355,2 − 288 = 67 V, contra 403 − 355,2 = 48 V).

Resposta. V_mín = 288 V; V_máx = 403 V. Os 355,2 V nominais ficam dentro da janela, um pouco mais perto do cheio.

Interpretação. O inversor e os contatores precisam cobrir de 288 V a 403 V, não só os 355 V nominais. A 288 V a mesma potência de 80 kW pede mais corrente; a 403 V, o isolamento e os semicondutores precisam aguentar a crista.

Erro comum a evitar. Multiplicar também pelo paralelo (2p), dobrando a tensão, ou usar 4,20 V como se já fosse a tensão do pacote.

15.7. Tempo de carga a 1 C e a 0,5 C (Básico)

Enunciado. No pacote de 100 Ah do exercício 15.1, quanto tempo leva uma carga de 0 a 100 % da capacidade a 1 C e a 0,5 C, em corrente constante e sem perdas? E se a janela útil for só os 90 % de DoD do mesmo exercício?

Conceito. A taxa C de 1 C é a corrente que carrega a capacidade nominal em 1 h: aqui, 100 A. A 0,5 C a corrente é metade e o tempo dobra. A janela útil de 90 % reduz o tempo na mesma proporção.

Fórmula. `I = C_taxa × Q, t = (ΔSOC) Q / I`

De onde vem. É a definição de taxa C em corrente, I = C_taxa Q, com Q em Ah e I em A. O tempo é carga dividida por corrente, em horas.

Resolução

1. **Carga completa.** A 1 C, I = 100 A e t = 100/100 = 1,00 h. A 0,5 C, I = 50 A e t = 2,00 h.
2. **Janela de 90 %.** t = 0,90 h = 54 min a 1 C, e 1,80 h = 1 h 48 min a 0,5 C.

Resposta. Carga completa: 1,00 h a 1 C e 2,00 h a 0,5 C. Na janela de 90 %: 54 min a 1 C e 1 h 48 min a 0,5 C.

Interpretação. A 1 C o pacote pede 100 A, bem menos do que os 225 A do pico de 80 kW, mas ainda é uma carga rápida para um ponto CA de 11 kW. Os 54 min da janela útil mostram o efeito do DoD sobre o tempo, não só sobre a energia.

Erro comum a evitar. Achar que 1 C é sempre 1 kW, ou aplicar os 90 % sobre a corrente no lugar de sobre o tempo.

15.8. Perda Joule a meia potência (Básico)

Enunciado. Com R = 60 mΩ e V_oc = 355,2 V do exercício 15.3, qual é a perda Joule a 40 kW, usando de novo I = P / V_oc? Quantas vezes ela é menor do que os 3,04 kW a 80 kW?

Conceito. A perda Joule vai com o quadrado da corrente. À metade da potência, a corrente cai à metade (neste modelo I = P / V_oc) e a perda cai a um quarto.

Fórmula. `I = P / V_oc, P_Joule = I² R`

De onde vem. É o mesmo circuito de Thévenin do exercício 15.3, avaliado agora em carga parcial.

Resolução

1. **Corrente e perda.** I = 40 000 / 355,2 = 113 A. P_Joule = 113² × 0,060 = 0,76 kW.
2. **Razão.** 0,76 / 3,04 = 0,25, exatamente um quarto, como (40/80)².

Resposta. P_Joule = 0,76 kW a 40 kW, um quarto dos 3,04 kW a 80 kW.

Interpretação. Rodar em carga parcial alivia muito o calor do pacote: metade da potência, um quarto da perda. É uma das razões de o cruzeiro aquecer bem menos do que uma ultrapassagem.

Erro comum a evitar. Achar que a perda também cai à metade (1,52 kW), esquecendo o quadrado da corrente.

15.9. Energia específica do pacote (Básico)

Enunciado. O pacote de 35,52 kWh do exercício 15.1 tem massa de exemplo de 180 kg, já com módulos, caixa e gestão térmica. Qual é a energia específica do pacote, em Wh/kg?

Conceito. A energia específica do pacote é a energia bruta dividida pela massa completa, não só das células. É o número que entra no projeto do veículo, como no exercício 12.7.

Fórmula. `e = E / m`

De onde vem. É a definição de energia específica. Com E em kWh e m em kg, multiplica-se por 1 000 para obter Wh/kg.

Resolução

1. **Aplicar a definição.** e = 35,52 / 180 × 1 000 = 197 Wh/kg.

Resposta. e = 197 Wh/kg.

Interpretação. Cerca de 200 Wh/kg no pacote é um valor ilustrativo realista para um hatch compacto, abaixo da densidade da célula solta, porque caixa, barramentos e resfriamento também pesam.

Erro comum a evitar. Dividir 35,52 por 180 e declarar 0,197 Wh/kg, esquecendo o fator 1 000, ou usar a massa só das células quando o enunciado pede o pacote.

15.10. Corrente a 80 kW na tensão mínima (Básico)

Enunciado. Na tensão mínima de 288 V do exercício 15.6, qual seria a corrente do pacote para entregar 80 kW, com I = P / V? Compare com os 225 A do exercício 15.3, calculados em 355,2 V.

Conceito. Para a mesma potência, a corrente sobe quando a tensão cai. No fim da descarga o pacote pede mais corrente — e gera mais calor — do que no ponto nominal.

Fórmula. `I = P / V`

De onde vem. É a definição de potência em corrente contínua, agora com a tensão do extremo vazio da janela.

Resolução

1. **Corrente no vazio.** I = 80 000 / 288 = 278 A.
2. **Comparar.** 278 / 225 = 1,23. A corrente sobe cerca de 23 % em relação ao ponto nominal.

Resposta. I = 278 A a 288 V, cerca de 23 % acima dos 225 A nominais.

Interpretação. O dimensionamento de cabos, contatores e células precisa olhar o pior caso de tensão, não só o nominal. No vazio, 80 kW já pedem quase 280 A neste pacote.

Erro comum a evitar. Manter 225 A porque a potência não mudou, ou usar 355,2 V outra vez.

15.11. Uma iteração da corrente com a tensão em carga (Intermediário)

Enunciado. No exercício 15.3, a primeira corrente foi I = P / V_oc = 225 A, com V_t = 341,7 V. Recalcule a corrente como I = P / V_t e obtenha a nova queda, a nova tensão em carga e a nova perda, com R = 60 mΩ e P = 80 kW.

Conceito. A potência sai na tensão de bornes, não em V_oc. Uma iteração, I = P / V_t, aproxima melhor a corrente real. A queda e a perda sobem um pouco em relação ao primeiro palpite.

Fórmula. `I_1 = P / V_t, ΔV_1 = R I_1, V_t,1 = V_oc − ΔV_1`

De onde vem. É o mesmo Thévenin do exercício 15.3, agora fechando o balanço com a tensão já reduzida pela queda.

Resolução

1. **Nova corrente.** I_1 = 80 000 / 341,7 = 234 A.
2. **Nova queda, tensão e perda.** ΔV_1 = 0,060 × 234 = 14,0 V. V_t,1 = 355,2 − 14,0 = 341,2 V. P_Joule = 234² × 0,060 = 3,29 kW.

Resposta. I_1 = 234 A; ΔV_1 = 14,0 V; V_t,1 = 341,2 V; P_Joule = 3,29 kW.

Interpretação. A iteração sobe a corrente de 225 A para 234 A e a perda de 3,04 kW para 3,29 kW. O primeiro palpite do exercício 15.3 continua bom para ordem de grandeza, mas o projeto térmico deve usar o valor iterado (ou o exato).

Erro comum a evitar. Recalcular I = P / V_oc outra vez, ou subtrair a nova queda de 341,7 V no lugar de 355,2 V.

15.12. Energia ao longo de 1 000 ciclos úteis (Intermediário)

Enunciado. Se cada ciclo usa os 31,97 kWh úteis do exercício 15.1, quanta energia o pacote entrega em 1 000 ciclos? Com o consumo de 14,7 kWh/100 km do exercício 12.3, a que distância isso corresponde?

Conceito. A energia de vida, neste modelo simples, é o produto da energia útil por ciclo pelo número de ciclos. A distância é essa energia dividida pelo consumo, com o fator 100 do kWh/100 km.

Fórmula. `E_vida = N E_útil, s = 100 E_vida / c`

De onde vem. É um balanço de energia ao longo da vida, sem degradar a capacidade a cada ciclo. O consumo de 14,7 kWh/100 km é o do cruzeiro a 100 km/h já usado no Módulo 3.

Resolução

1. **Energia de vida.** E_vida = 1 000 × 31,97 = 31 970 kWh.
2. **Distância equivalente.** s = 100 × 31 970 / 14,7 = 217 000 km.

Resposta. 31 970 kWh em 1 000 ciclos, cerca de 217 000 km com 14,7 kWh/100 km.

Interpretação. Duzentos e dezessete mil quilômetros é uma vida útil ilustrativa longa para um hatch, se cada ciclo fosse um ‘cheio a vazio’ da janela útil. Na prática os ciclos são mais rasos e a capacidade degrada, então este número é um teto.

Erro comum a evitar. Usar os 35,52 kWh brutos no lugar dos 31,97 kWh úteis, ou esquecer o fator 100 do consumo.

15.13. Elevação de temperatura da água de arrefecimento (Intermediário)

Enunciado. Os 3,04 kW de perda do exercício 15.3 são retirados por água com vazão de 4,0 kg/min e calor específico 4 180 J/(kg·K) (dados de exemplo). Qual é a elevação de temperatura da água em regime permanente?

Conceito. Em regime permanente, todo o calor vai para o fluido: P = ṁ c ΔT. Isolando ΔT se vê se a vazão e a água bastam para aquele ponto de perda.

Fórmula. `ΔT = P / (ṁ c)`

De onde vem. É o balanço térmico de um trocador em que o fluido leva todo o calor, sem perdas para o ar neste modelo.

Resolução

1. **Vazão no SI.** ṁ = 4,0 / 60 = 0,0667 kg/s.
2. **Elevação.** ΔT = 3 040 / (0,0667 × 4 180) = 3 040 / 279 = 10,9 K.

Resposta. ΔT = 10,9 K.

Interpretação. Onze kelvin de aquecimento da água, a 4 kg/min, são um pedido sério de radiador e de bomba, mas tratável. Se a vazão cair à metade, o ΔT dobra e a célula aquece junto.

Erro comum a evitar. Usar 4 kg/s no lugar de 4 kg/min, o que daria 0,18 K, ou esquecer de converter kW para W.

15.14. Integração de carga (coulomb counting) (Intermediário)

Enunciado. O pacote de 100 Ah parte com SOC 80 %. Descarrega 50 A constantes durante 30 min (dados de exemplo). Qual é o SOC final, neste modelo de integração de corrente, sem perdas nem auto-descarga?

Conceito. A variação de carga é corrente vezes tempo. Em Ah, $\Delta Q = I\,t$ com t em horas. O SOC cai na razão $\Delta Q / Q$.

Fórmula. `SOC_f = SOC_i − I t / Q`

De onde vem. É a definição de estado de carga por balanço de ampère-hora, o método mais simples de um BMS, que depois precisa ser corrigido por tensão e temperatura.

Resolução

1. **Carga retirada.** $\Delta Q = 50 \times 0{,}50 = 25{,}0$ Ah.
2. **SOC final.** $SOC_f = 80\ \% - 100 \times 25{,}0 / 100 = 55\ \%$.

Resposta. SOC final = 55 %.

Interpretação. Meia hora a 50 A tira um quarto da capacidade e derruba o SOC de 80 % para 55 %. O método é direto, mas deriva se a corrente for medida com erro ou se houver auto-descarga — por isso o BMS também olha a tensão.

Erro comum a evitar. Usar 30 min como 30 h ($\Delta Q = 1\,500$ Ah), ou subtrair 50 A de 80 % sem passar pelos ampère-hora.

15.15. Resistência equivalente de uma célula (Intermediário)

Enunciado. A resistência interna do pacote 96s2p é 60 mΩ (exercício 15.3). Qual é a resistência equivalente de uma célula, se todas forem iguais?

Conceito. No arranjo n_s em série e n_p em paralelo, a resistência do pacote é $R_{pacote} = (n_s / n_p)\,R_{cél}$. Isolando a célula, $R_{cél} = R_{pacote} \times n_p / n_s$.

Fórmula. `R_cél = R_pacote × n_p / n_s`

De onde vem. Resistências em série se somam e ramos iguais em paralelo dividem por n_p. O fator n_s / n_p escala a célula até o pacote.

Resolução

1. **Isolar a célula.** $R_{cél} = 60 \times 2 / 96 = 1{,}25$ mΩ.

Resposta. $R_{cél} = 1{,}25$ mΩ.

Interpretação. Um miliohm e quarto por célula é um valor baixo, típico de uma célula de potência. Se uma célula do ramo degradar e subir essa resistência, o pacote inteiro sente no R de 60 mΩ e no calor do exercício 15.3.

Erro comum a evitar. Multiplicar 60 mΩ por 96, ou esquecer o paralelo e dividir só por 96 (0,625 mΩ).

15.16. Envelhecimento: resistência 50 % maior (Intermediário)

Enunciado. Depois de um tempo de uso, a resistência interna sobe de 60 mΩ para 90 mΩ (dado de exemplo). Com V_oc = 355,2 V e 80 kW, no mesmo modelo I = P / V_oc do exercício 15.3, quais são a nova queda, a tensão em carga, a perda e o rendimento ôhmico?

Conceito. Com a corrente quase a mesma (ainda I = P / V_oc), a queda, a perda e a perda de rendimento crescem na proporção de R. Uma resistência 50 % maior piora o calor e a tensão de bornes no mesmo passo.

Fórmula. $\Delta V = R\ I,\ P_{Joule} = I^2\ R,\ \eta = (V_{oc} - \Delta V) / V_{oc}$

De onde vem. É o Thévenin do exercício 15.3 com o R já envelhecido, mantendo o mesmo critério de corrente para a comparação ser direta.

Resolução

1. **Corrente (igual).** I = 80 000 / 355,2 = 225 A, como antes.
2. **Novos valores.** ΔV = 0,090 × 225 = 20,3 V. V_t = 355,2 − 20,3 = 334,9 V. P_Joule = 225² × 0,090 = 4,56 kW. η = 334,9 / 355,2 = 0,943 = 94,3 %.

Resposta. ΔV = 20,3 V; V_t = 334,9 V; P_Joule = 4,56 kW; η_ôhmico = 94,3 %.

Interpretação. A perda sobe de 3,04 kW para 4,56 kW, 50 % a mais, e o rendimento ôhmico cai de 96,2 % para 94,3 %. O pacote velho aquece mais e entrega menos tensão no mesmo pedido de 80 kW.

Erro comum a evitar. Manter a queda de 13,5 V e só mudar o rendimento, ou calcular a nova perda como 3,04 + 50 % de 80 kW.

15.17. Capacidade reduzida a 0 °C (Intermediário)

Enunciado. A 0 °C, um fator ilustrativo reduz a capacidade do pacote a 80 % da de 25 °C. Qual é a energia bruta e a útil (DoD 90 %) nesse frio? Com 14,7 kWh/100 km, qual autonomia resulta da energia útil?

Conceito. O frio reduz a capacidade disponível. Neste modelo o fator se aplica à energia do pacote; a autonomia cai na mesma proporção da energia útil.

Fórmula. $E_{frio} = f\ E,\ E_{útil,frio} = DoD\ E_{frio},\ A = 100\ E_{útil,frio} / c$

De onde vem. É o mesmo balanço dos exercícios 15.1 e 12.2, com um fator de temperatura ilustrativo aplicado à energia.

Resolução

1. **Energias no frio.** E_frio = 0,80 × 35,52 = 28,42 kWh. E_útil = 0,90 × 28,42 = 25,57 kWh.
2. **Autonomia.** A = 100 × 25,57 / 14,7 = 174 km.

Resposta. E_bruta = 28,42 kWh; E_útil = 25,57 kWh; autonomia 174 km.

Interpretação. A autonomia cai de cerca de 217 km (31,97 kWh / 14,7) para 174 km, uma perda de 43 km só pelo fator de 80 %. No frio real ainda entram o clima e a resistência interna maior.

Erro comum a evitar. Aplicar os 80 % sobre a autonomia de 246 km do ciclo misto, misturando consumos, ou esquecer o DoD de 90 %.

15.18. Carga rápida de 10 % a 80 % em 50 kW (Intermediário)

Enunciado. Um carregador de 50 kW, sem perdas e sem taper, leva o pacote de 35,52 kWh de 10 % a 80 % de carga. Qual energia entra, qual é o tempo e qual é a taxa C dessa potência?

Conceito. A janela 10–80 % é a faixa usual de uma parada rápida, antes do taper. A energia é 70 % da capacidade bruta; o tempo é essa energia dividida pela potência; a taxa C é P / E.

Fórmula. `E = 0,70 E_bruta, t = E / P, C = P / E_bruta`

De onde vem. É o mesmo balanço do exercício 15.2, agora com 50 kW e a janela 10–80 % típica de CCS em viagem.

Resolução

1. **Energia da janela.** E = 0,70 × 35,52 = 24,86 kWh.
2. **Tempo e taxa C.** t = 24,86 / 50 = 0,497 h = 30 min. C = 50 / 35,52 = 1,41 C.

Resposta. 24,86 kWh; t ≈ 30 min; 1,41 C, sem perdas nem taper.

Interpretação. Meia hora em 50 kW cobre a janela 10–80 % deste pacote pequeno, no modelo ideal. O taper perto de 80 % e as perdas do cabo alongam um pouco o tempo real, mas o número já mostra por que 50 kW são úteis em um BEV de 35 kWh.

Erro comum a evitar. Usar 80 % − 10 % como 70 kWh, ou dividir 35,52 kWh inteiros por 50 kW (43 min) esquecendo a janela.

15.19. OCV linear a 50 % de SOC (Intermediário)

Enunciado. Adote um modelo ilustrativo em que a tensão de circuito aberto da célula varia linearmente de 3,00 V (SOC 0 %) a 4,20 V (SOC 100 %). Qual é a OCV da célula e do pacote 96s2p a 50 % de SOC?

Conceito. No modelo linear, a OCV da célula é V_mín + SOC × (V_máx − V_mín). A OCV do pacote é n_s vezes essa tensão, porque o paralelo não muda a tensão.

Fórmula. `V_cél = V_mín + SOC (V_máx − V_mín), V_pacote = n_s V_cél`

De onde vem. É uma interpolação linear da curva OCV, útil para ordem de grandeza. A curva real de íon-lítio não é reta, mas o ponto médio já situa o BMS.

Resolução

1. **Célula.** V_cél = 3,00 + 0,50 × (4,20 − 3,00) = 3,00 + 0,60 = 3,60 V.
2. **Pacote.** V_pacote = 96 × 3,60 = 345,6 V.

Resposta. V_cél = 3,60 V; V_pacote = 345,6 V a 50 % de SOC.

Interpretação. No ponto médio da janela 3,00–4,20 V o pacote fica em 345,6 V, um pouco abaixo dos 355,2 V nominais (que correspondem a 3,70 V por célula, cerca de 58 % neste modelo linear). A diferença já mostra o limite do modelo retilíneo.

Erro comum a evitar. Usar 3,70 V no lugar da interpolação, ou multiplicar também pelo paralelo (2p).

15.20. Tempo de carga de 10 % a 90 % com perdas no carregador (Intermediário)

Enunciado. Retome a janela de 10 % a 90 % do exercício 15.2 (28,42 kWh no pacote de 35,52 kWh) e o carregador de 11 kW, agora com rendimento 0,90. Qual potência de fato entra no pacote e quanto tempo leva a carga, ainda sem taper?

Conceito. O rendimento do carregador reduz a potência que chega à bateria: $P_{bat} = \eta P_{rede}$. O tempo cresce na inversa desse rendimento em relação aos 2 h 35 min do exercício 15.2.

Fórmula. $P_{bat} = \eta P_{rede}, \; t = E_{janela} / P_{bat}$

De onde vem. É o balanço de energia da recarga, agora incluindo a perda do carregador, que o exercício 15.2 tinha desprezado de propósito.

Resolução

1. **Potência no pacote.** $P_{bat} = 0{,}90 \times 11 = 9{,}9$ kW.
2. **Tempo.** $t = 28{,}42 / 9{,}9 = 2{,}87$ h = 2 h 52 min, 17 min a mais do que os 2 h 35 min sem perdas.

Resposta. $P_{bat} = 9{,}9$ kW; t = 2 h 52 min, sem taper.

Interpretação. Os 10 % de perda no carregador acrescentam 17 min à conta ideal do exercício 15.2. Em um ponto residencial isso importa no planejamento da noite; em um carregador de 50 kW o efeito absoluto é menor em minutos, mas a energia paga na rede continua maior.

Erro comum a evitar. Dividir 28,42 kWh por 11 kW outra vez, ou aplicar o rendimento sobre o tempo (multiplicar 2 h 35 min por 0,90, o que encurtaria a carga).

15.21. Potência de curto no limite de tensão mínima (Desafio)

Enunciado. Com $V_{oc} = 355{,}2$ V, R = 60 mΩ e $V_{mín} = 288$ V dos exercícios 15.3 e 15.6, qual é a maior corrente que ainda deixa a tensão de bornes em 288 V? Qual potência o pacote entregaria nesse ponto? É um teto teórico, não um regime de uso.

Conceito. A tensão de bornes é $V_t = V_{oc} - R\,I$. Impondo $V_t = V_{mín}$, a corrente máxima é $(V_{oc} - V_{mín}) / R$. A potência é $V_{mín}$ vezes essa corrente. Na prática o BMS corta muito antes.

Fórmula. $I_{máx} = (V_{oc} - V_{mín}) / R, \; P = V_{mín}\, I_{máx}$

De onde vem. É o Thévenin do exercício 15.3 no canto da janela de tensão, o ponto de maior corrente ainda ‘dentro’ de 288 V.

Resolução

1. **Corrente máxima.** $I_{máx} = (355{,}2 - 288) / 0{,}060 = 67{,}2 / 0{,}060 = 1\,120$ A.
2. **Potência.** $P = 288 \times 1\,120 = 322\,600$ W = 323 kW.

Resposta. $I_{máx} = 1\,120$ A; P = 323 kW, só como teto teórico.

Interpretação. Trezentos e vinte e três quilowatts e mais de 1 000 A estão muito além dos 80 kW e 225 A de uso. Este número mostra o que o R interno permitiria no papel; cabos, células e fusíveis não aguentam, e o BMS deve impedir esse ponto.

Erro comum a evitar. Calcular $I = 288 / 0{,}060 = 4\,800$ A, esquecendo que a queda é só $V_{oc} - V_{mín}$, ou tratar 323 kW como potência contínua.

15.22. Aquecimento adiabático em 10 min a 80 kW (Desafio)

Enunciado. Os 3,04 kW de perda do exercício 15.3 são integralmente absorvidos pela massa de 180 kg do pacote (exercício 15.9) durante 10 min, com calor específico ilustrativo de 800 J/(kg·K) e sem troca com a água. Qual é a elevação de temperatura?

Conceito. No pulso curto, um modelo adiabático dá o teto de aquecimento: a energia térmica E = P t vira m c ΔT. A água do exercício 15.13 existiria para impedir esse teto de se confirmar.

Fórmula. `ΔT = P t / (m c)`

De onde vem. É o balanço Q = m c ΔT, com Q igual à integral da perda no intervalo, aqui P constante vezes t.

Resolução

1. **Energia térmica.** Q = 3,04 kW × 600 s = 1 824 kJ.
2. **Elevação.** ΔT = 1 824 000 / (180 × 800) = 1 824 000 / 144 000 = 12,7 K.

Resposta. ΔT = 12,7 K em 10 min, neste modelo sem refrigeração.

Interpretação. Treze kelvin em dez minutos, se a água falhasse, já são um aviso: um trecho longo a 80 kW não pode depender só da inércia térmica do pacote. Por isso a vazão do exercício 15.13 faz parte do projeto, não é acessório.

Erro comum a evitar. Usar t = 10 s no lugar de 10 min, ou esquecer de converter 3,04 kW para joules.

15.23. Custo ilustrativo do pacote por kWh (Desafio)

Enunciado. Adote um custo de exemplo de R$ 800 por kWh bruto. Qual é o custo do pacote de 35,52 kWh? Qual é o custo por quilômetro, se essa quantia for diluída nos 217 000 km do exercício 15.12, sem valor residual?

Conceito. O custo do pacote é o preço por kWh vezes a energia bruta. Diluído na distância de vida ilustrativa, vira um custo de depreciação da bateria por quilômetro, aparte da energia elétrica do exercício 12.14.

Fórmula. `C = p E, c_km = C / s`

De onde vem. É uma conta de depreciação linear simples, com um preço ilustrativo e a distância já calculada em 15.12.

Resolução

1. **Custo do pacote.** C = 800 × 35,52 = R$ 28 416.
2. **Por quilômetro.** c_km = 28 416 / 217 000 = 0,131 R$/km.

Resposta. C = R$ 28 416; cerca de R$ 0,131 /km nos 217 000 km deste exemplo.

Interpretação. Treze centavos por quilômetro de depreciação da bateria, neste preço e nesta vida, são da mesma ordem do custo de energia do BEV no exercício 12.14 (cerca de R$ 0,12 /km a 14,7 kWh/100 km e R$ 0,80 /kWh). O resultado muda muito com o preço do kWh instalado e com a vida real.

Erro comum a evitar. Multiplicar R$ 800 pelos 31,97 kWh úteis quando o enunciado pede o bruto, ou diluir por 1 000 ciclos no lugar da distância.

15.24. Autonomia depois de 20 % de fade (Desafio)

Enunciado. Depois de anos de uso, a energia útil cai 20 % em relação aos 31,97 kWh do exercício 15.1. Qual é a energia útil restante? Com 14,7 kWh/100 km, qual autonomia resta?

Conceito. O fade de capacidade reduz a energia útil na mesma proporção, e a autonomia cai junto, se o consumo não mudar. É um modelo de fim de vida ilustrativo, típico de 80 % da capacidade inicial.

Fórmula. `E_fim = (1 − f) E_útil, A = 100 E_fim / c`

De onde vem. É o mesmo balanço de autonomia dos exercícios 12.2 e 15.17, agora com um fator de envelhecimento aplicado à energia útil.

Resolução

1. **Energia restante.** E_fim = 0,80 × 31,97 = 25,58 kWh.
2. **Autonomia.** A = 100 × 25,58 / 14,7 = 174 km.

Resposta. E_útil = 25,58 kWh; autonomia 174 km.

Interpretação. A autonomia cai de cerca de 217 km para 174 km, a mesma ordem da perda pelo frio do exercício 15.17, porque 80 % de 31,97 kWh coincidem com 90 % de 80 % de 35,52 kWh. Fade e temperatura, somados, apertam ainda mais a viagem.

Erro comum a evitar. Aplicar os 20 % sobre os 35,52 kWh brutos e ainda multiplicar por 0,90 outra vez, ou sobre a autonomia de 246 km do ciclo misto.

15.25. Tempo de equalização passiva (Desafio)

Enunciado. Duas células de 50 Ah de um mesmo ramo diferem de 50 mV, e a janela OCV da célula é 1,20 V entre vazio e cheio (modelo linear do exercício 15.19). Um circuito de equalização passiva drena 100 mA da célula mais cheia. Em quanto tempo a diferença de carga se anula, se a OCV acompanhar o SOC de forma linear?

Conceito. No modelo linear, 50 mV em uma janela de 1,20 V são 50/1 200 da capacidade, ou seja, uma diferença de carga ΔQ = (ΔV / ΔV_janela) Q. O tempo de drenagem é ΔQ / I_eq.

Fórmula. `ΔQ = (ΔV / ΔV_janela) Q, t = ΔQ / I_eq`

De onde vem. É a conversão de um desvio de tensão em desvio de carga, pela inclinação da OCV, seguida do balanço de ampère-hora do equalizador.

Resolução

1. **Diferença de carga.** ΔQ = (0,050 / 1,20) × 50 = 2,08 Ah.
2. **Tempo.** t = 2,08 / 0,100 = 20,8 h.

Resposta. ΔQ = 2,08 Ah; t = 20,8 h a 100 mA.

Interpretação. Quase 21 h a 100 mA mostram por que a equalização passiva é lenta e costuma rodar durante a carga lenta, não no meio de uma viagem. Um desvio maior, ou uma corrente menor, alonga ainda mais o tempo.

Erro comum a evitar. Tratar 50 mV como 50 % de SOC, ou usar 50 A no lugar de 100 mA.

15.26. Taxa C incluindo a perda Joule (Desafio)

Enunciado. Para entregar 80 kW nos bornes, o pacote também fornece os 3,04 kW de perda do exercício 15.3. Qual é a potência química retirada e a taxa C correspondente, sobre os 35,52 kWh brutos?

Conceito. A potência que sai das células é a de bornes mais a perda Joule. A taxa C de descarga deve ser calculada com essa potência química, não só com os 80 kW líquidos.

Fórmula. `P_quím = P + P_Joule, C = P_quím / E`

De onde vem. É o balanço de potência do Thévenin: a fonte V_oc entrega P + I² R, e só P chega aos bornes.

Resolução

1. **Potência química.** P_quím = 80 + 3,04 = 83,04 kW.
2. **Taxa C.** C = 83,04 / 35,52 = 2,34 C, um pouco acima dos 2,25 C do exercício 15.2.

Resposta. P_quím = 83,04 kW; C = 2,34 C.

Interpretação. Os 2,25 C do exercício 15.2 eram a taxa ‘líquida’. Incluindo o cobre interno, o pedido às células é 2,34 C. A diferença é pequena neste R, mas cresce quando a resistência envelhece, como no exercício 15.16.

Erro comum a evitar. Somar 80 kW com 3,04 kW e dividir por 31,97 kWh úteis, ou declarar 2,25 C outra vez.

15.27. Rendimento de ida e volta ôhmico (Desafio)

Enunciado. Se o rendimento ôhmico da descarga é 96,2 % (exercício 15.3) e o da carga, no mesmo ponto de corrente, for igual, qual é o rendimento de ida e volta só da resistência interna?

Conceito. Na ida e volta, a corrente atravessa R duas vezes. Se os rendimentos de carga e descarga forem iguais, o round-trip ôhmico é o quadrado de cada um.

Fórmula. `η_ida-volta = η_desc η_carga`

De onde vem. É o produto de dois rendimentos em série no tempo: a energia que volta à rede, depois de sair e regressar pelo mesmo R, sofre as duas quedas.

Resolução

1. **Produto.** η_ida-volta = 0,962 × 0,962 = 0,925 = 92,5 %.

Resposta. η_ida-volta = 92,5 %, só da parcela ôhmica.

Interpretação. Quase 7,5 % da energia se perde só no R interno, ida e volta, neste ponto de 80 kW. Ainda faltam o carregador, o inversor e o clima. Cargas mais mansas, como a de 11 kW, têm perda ôhmica bem menor, pelo quadrado da corrente.

Erro comum a evitar. Somar 96,2 % + 96,2 % ou subtrair 3,8 % duas vezes de 100 % e declarar 92,4 % sem fazer o produto — o erro é pequeno aqui, mas o método certo é multiplicar.

15.28. Erro de SOC por desvio de corrente (Desafio)

Enunciado. Um sensor de corrente do pacote de 100 Ah tem um desvio constante de +2,0 A (dado de exemplo). Depois de 1,0 h de integração, qual é o erro de SOC no coulomb counting do exercício 15.14?

Conceito. O erro de carga é o desvio de corrente vezes o tempo. Em um pacote de 100 Ah, 2 Ah de erro são 2 pontos percentuais de SOC, e o desvio cresce linearmente com o tempo se não for corrigido.

Fórmula. `ΔSOC = I_erro t / Q`

De onde vem. É a mesma integração de ampère-hora do exercício 15.14, agora aplicada só ao erro do sensor.

Resolução

1. **Erro de carga e de SOC.** ΔQ = 2,0 × 1,0 = 2,0 Ah. ΔSOC = 100 × 2,0 / 100 = 2,0 pontos percentuais.

Resposta. ΔSOC = 2,0 pontos percentuais depois de 1,0 h.

Interpretação. Dois pontos percentuais por hora, se o desvio não for calibrado, viram 16 pontos em um dia de 8 h. Por isso o BMS recalibra o SOC com a OCV em repouso e não confia só na integração de corrente.

Erro comum a evitar. Dividir 2 A por 100 Ah e declarar 0,02 A, ou esquecer de multiplicar pelo tempo.

15.29. Potência contínua limitada pelo calor (Desafio)

Enunciado. O sistema térmico do pacote admite no máximo 2,00 kW de perda Joule em regime contínuo (dado de exemplo), com R = 60 mΩ. Qual é a maior corrente contínua? Qual potência nos bornes isso permite, usando V_t = V_oc − R I e V_oc = 355,2 V?

Conceito. A perda I² R não pode ultrapassar o teto térmico. A corrente máxima contínua é a raiz de P_lim / R. A potência de bornes é V_t I, já descontada a queda.

Fórmula. `I_máx = √(P_lim / R), P = (V_oc − R I_máx) I_máx`

De onde vem. Vem do limite P_Joule = I² R ≤ P_lim e do Thévenin já usado no exercício 15.3.

Resolução

1. **Corrente máxima.** I_máx = √(2 000 / 0,060) = √33 333 = 183 A.
2. **Potência nos bornes.** V_t = 355,2 − 0,060 × 183 = 355,2 − 11,0 = 344,2 V. P = 344,2 × 183 = 63,0 kW.

Resposta. I_máx = 183 A; P = 63,0 kW contínuos, neste teto de 2,00 kW.

Interpretação. Com 2 kW de teto térmico o pacote não sustenta os 80 kW do exercício 15.3 em contínuo — só cerca de 63 kW. Os 80 kW continuam possíveis em pulso, como uma ultrapassagem, enquanto a água e a inércia térmica aguentarem.

Erro comum a evitar. Calcular I = 2 000 / 0,060 = 33 000 A, esquecendo a raiz, ou usar P = V_oc I sem descontar a queda.

15.30. Resistência máxima para 80 kW contínuos (Desafio)

Enunciado. Para sustentar 80 kW contínuos com no máximo 2,50 kW de perda Joule e I = 225 A (modelo do exercício 15.3), qual seria a maior resistência interna admissível? Os 60 mΩ atuais passam nesse critério?

Conceito. A perda $I^2 R$ não pode ultrapassar o teto. Isolando R, $R_{máx} = P_{lim} / I^2$. Compara-se esse teto com os 60 mΩ medidos.

Fórmula. $R_{máx} = P_{lim} / I^2$

De onde vem. É a inversão de $P_{Joule} = I^2 R$, com I preso ao valor do exercício 15.3 para a comparação ser direta.

Resolução

1. **R máximo.** $R_{máx} = 2\,500 / 225^2 = 2\,500 / 50\,625 = 0{,}0494\ \Omega = 49{,}4\ m\Omega$.
2. **Comparar.** 60 mΩ é maior do que 49,4 mΩ, então não passa: a 225 A a perda seria 3,04 kW, acima do teto de 2,50 kW.

Resposta. $R_{máx} = 49{,}4\ m\Omega$. Os 60 mΩ atuais não passam neste critério de 2,50 kW.

Interpretação. Para tornar 80 kW contínuos, este pacote precisaria de R menor (células de menor resistência ou mais ramos em paralelo) ou de um teto térmico acima de 3,04 kW. Este exercício fecha a disciplina ligando calor, resistência e o que o pacote pode sustentar de fato.

Erro comum a evitar. Calcular $R = 2{,}50\ kW / 225\ A = 11\ \Omega$, esquecendo o quadrado da corrente, ou comparar 49,4 mΩ com 60 Ω.

Recarga e Infraestrutura de Recarga (16 h)

16.1. Tempo de carga de 20 % a 80 % (Básico)

Enunciado. Uma bateria de 32,0 kWh úteis vai de 20 % a 80 %. Estime o tempo em um carregador CA de 7,4 kW com rendimento 0,90 e em um CC de 50 kW com rendimento 0,95, sem considerar o taper no fim da carga (dados de exemplo).

Conceito. A energia que precisa entrar na bateria é a fração da janela vezes a energia útil. A potência que de fato chega à bateria é a do carregador vezes o rendimento. O tempo é energia dividida por essa potência, sem curva de taper.

Fórmula. `E = (SOC_f − SOC_i) E_útil, t = E / (P η)`

De onde vem. É um balanço de energia a potência constante. O rendimento reduz o que entra na bateria; o taper, desprezado aqui, alongaria o fim da carga.

Resolução

1. **Energia da janela.** E = (0,80 − 0,20) × 32,0 = 19,2 kWh.
2. **Tempo CA.** P_bat = 7,4 × 0,90 = 6,66 kW. t = 19,2 / 6,66 = 2,88 h = 2 h 53 min.
3. **Tempo CC.** P_bat = 50 × 0,95 = 47,5 kW. t = 19,2 / 47,5 = 0,404 h = 24 min.

Resposta. CA 7,4 kW: 2 h 53 min. CC 50 kW: 24 min (sem taper).

Interpretação. A mesma janela de 19,2 kWh leva quase três horas na tomada CA e cerca de vinte e quatro minutos no CC de 50 kW, neste modelo sem taper. O rendimento 0,90 e 0,95 já está incluído: sem ele os tempos seriam um pouco menores.

Erro comum a evitar. Dividir 19,2 kWh por 7,4 kW esquecendo o rendimento, ou usar os 32,0 kWh inteiros no lugar da janela 20–80 %.

16.2. Potência disponível na instalação (Básico)

Enunciado. Calcule a potência de um ponto monofásico 220 V / 32 A e de um ponto trifásico 380 V / 32 A (dados de exemplo, fator de potência unitário).

Conceito. Em monofásico, P = V I quando o fator de potência é 1. Em trifásico, entra o fator √3: P = √3 V I, com V a tensão entre fases.

Fórmula. `P_1φ = V I, P_3φ = √3 V I`

De onde vem. São as expressões clássicas de potência ativa em regime senoidal, com fp = 1 como pede o enunciado. Usa-se √3 ≈ 1,732.

Resolução

1. **Monofásico.** P = 220 × 32 = 7 040 W = 7,04 kW.
2. **Trifásico.** P = 1,732 × 380 × 32 = 21 060 W = 21,06 kW.

Resposta. Monofásico: 7,04 kW. Trifásico: 21,06 kW.

Interpretação. O ponto trifásico de 32 A entrega o triplo do monofásico, como o √3 × 380 / 220 ≈ 3,0. Um wallbox de ‘7 kW’ cabe no monofásico de 32 A a 220 V; um de 22 kW pede o trifásico (ou 32 A a 400 V).

Erro comum a evitar. Usar √3 também no monofásico, ou esquecer o √3 no trifásico e declarar 12,16 kW (380 × 32).

16.3. Demanda de uma frota pequena (Básico)

Enunciado. Dez up! elétricos de uma frota rodam o equivalente a 30 kWh por veículo por dia e recarregam à noite, em 8 h (dados de exemplo). Qual é a potência média da instalação? Se a tarifa ilustrativa for R$ 0,80 / kWh, qual é o custo diário de energia?

Conceito. A energia diária da frota é o produto do número de veículos pelo consumo de cada um. A potência média é essa energia dividida pelo tempo de recarga. O custo é a energia vezes a tarifa.

Fórmula. `E_dia = N E_veíc, P_méd = E_dia / t, C = E_dia p`

De onde vem. São definições de energia, potência média e custo, com a recarga espalhada de forma uniforme nas 8 h neste modelo.

Resolução

1. **Energia da frota.** E_dia = 10 × 30 = 300 kWh/dia.
2. **Potência média e custo.** P_méd = 300 / 8 = 37,5 kW. C = 300 × 0,80 = R$ 240 / dia.

Resposta. 300 kWh/dia; P_média = 37,5 kW no período de 8 h; custo = R$ 240 / dia (tarifa de exemplo).

Interpretação. Trinta e sete e meio quilowatts médios cabem em duas tomadas trifásicas de 21 kW, ou em cerca de seis monofásicas de 7 kW, se a frota puder ser escalonada. O custo de R$ 240 / dia é só energia, sem demanda nem estacionamento.

Erro comum a evitar. Dividir 30 kWh por 8 h e esquecer os dez veículos (3,75 kW), ou calcular o custo com a potência no lugar da energia.

16.4. O 7,4 kW cabe no circuito de 32 A? (Básico)

Enunciado. Um wallbox de 7,4 kW monofásico seria ligado em 220 V. Qual corrente ele pede? O disjuntor e o cabo do exercício 16.2, dimensionados para 32 A, bastam?

Conceito. A corrente é a potência dividida pela tensão, com fator de potência 1. Compara-se o valor com a capacidade do circuito.

Fórmula. `I = P / V`

De onde vem. É a inversão de P = V I, já usada no exercício 16.2.

Resolução

1. **Corrente pedida.** I = 7 400 / 220 = 33,6 A.
2. **Comparar.** 33,6 A é maior do que 32 A, então o circuito do exercício 16.2 não basta para 7,4 kW contínuos a 220 V. A potência máxima nesse circuito é os 7,04 kW já calculados.

Resposta. I = 33,6 A, acima dos 32 A do circuito; não cabe. A potência máxima a 220 V / 32 A é 7,04 kW.

Interpretação. O ‘7,4 kW’ clássico assume 230 V × 32 A = 7,36 kW. Em 220 V a mesma corrente só entrega 7,04 kW. O wallbox precisa ser limitado a 32 A, ou a instalação precisa ir a 40 A, para de fato rodar 7,4 kW.

Erro comum a evitar. Dividir 7,4 kW por 32 A e declarar 231 V, ou aceitar 33,6 A em um disjuntor de 32 A como se houvesse folga.

16.5. Tempo de uma carga completa em 7,4 kW (Básico)

Enunciado. Com a mesma bateria de 32,0 kWh úteis e o carregador CA de 7,4 kW com rendimento 0,90, quanto tempo leva uma carga de 0 % a 100 %, ainda sem taper?

Conceito. Agora a janela é a energia útil inteira. O tempo é essa energia dividida pela potência que chega à bateria.

Fórmula. `t = E_útil / (P η)`

De onde vem. É o mesmo balanço do exercício 16.1, com SOC_i = 0 e SOC_f = 100 %.

Resolução

1. **Potência na bateria e tempo.** P_bat = 7,4 × 0,90 = 6,66 kW. t = 32,0 / 6,66 = 4,80 h = 4 h 48 min.

Resposta. t = 4 h 48 min, sem taper.

Interpretação. Uma carga cheia nesta potência pede quase cinco horas. Por isso a recarga noturna de 8 h do exercício 16.3 tem folga para 32 kWh, e a janela 20–80 % do exercício 16.1 é bem mais curta.

Erro comum a evitar. Usar 19,2 kWh outra vez, ou esquecer o rendimento e declarar 32 / 7,4 = 4,3 h.

16.6. Energia retirada da rede (Básico)

Enunciado. Para entregar os 19,2 kWh da janela 20–80 % na bateria, quanta energia a rede precisa fornecer no CA de 7,4 kW (η = 0,90) e no CC de 50 kW (η = 0,95)?

Conceito. A rede fornece a energia da bateria dividida pelo rendimento. A diferença é a perda do carregador e da etapa de potência.

Fórmula. `E_rede = E_bat / η`

De onde vem. É a definição de rendimento: η = E_bat / E_rede, isolando a energia da rede.

Resolução

1. **CA e CC.** CA: E_rede = 19,2 / 0,90 = 21,3 kWh. CC: E_rede = 19,2 / 0,95 = 20,2 kWh.

Resposta. CA: 21,3 kWh da rede. CC: 20,2 kWh da rede.

Interpretação. Para a mesma carga de 19,2 kWh, o CA pede cerca de 1,1 kWh a mais da rede do que o CC, neste par de rendimentos. Essa diferença aparece na conta de luz, não no tempo do exercício 16.1.

Erro comum a evitar. Multiplicar 19,2 kWh pelo rendimento no lugar de dividir, obtendo 17,3 kWh e 18,2 kWh, menores do que a energia da bateria.

16.7. Custo de uma carga cheia em casa (Básico)

Enunciado. Qual é o custo de repor os 32,0 kWh úteis em um ponto CA com rendimento 0,90, à tarifa ilustrativa de R$ 0,80 / kWh?

Conceito. A rede fornece E_útil / η. O custo é essa energia vezes a tarifa.

Fórmula. `C = (E_útil / η) p`

De onde vem. Combina o exercício 16.6 com a tarifa já usada no exercício 16.3.

Resolução

1. **Energia da rede e custo.** E_rede = 32,0 / 0,90 = 35,6 kWh. C = 35,6 × 0,80 = R$ 28,44.

Resposta. C = R$ 28,44 por carga cheia, nesta tarifa de exemplo.

Interpretação. Cerca de vinte e oito reais por 32 kWh úteis. Se o consumo de estrada for 14,7 kWh/100 km, essa carga cobre cerca de 218 km, ou uns R$ 0,13 / km, no mesmo ordem do exercício 15.23.

Erro comum a evitar. Calcular 32 × 0,80 = R$ 25,60, esquecendo que a rede entrega mais do que entra na bateria.

16.8. Energia por ponto numa noite (Básico)

Enunciado. Um ponto monofásico de 7,04 kW (exercício 16.2) fica ocupado durante as 8 h da janela noturna, com rendimento 0,90 até a bateria. Quanta energia ele entrega a um veículo?

Conceito. A energia na bateria é a potência do ponto vezes o tempo vezes o rendimento. Compara-se com os 32,0 kWh úteis e com os 30 kWh/dia da frota.

Fórmula. `E_bat = P t η`

De onde vem. É o produto potência–tempo, já com o rendimento do carregador.

Resolução

1. **Energia entregue.** E_bat = 7,04 × 8 × 0,90 = 50,7 kWh.

Resposta. E_bat = 50,7 kWh por noite, se o ponto ficar as 8 h no máximo.

Interpretação. Cinquenta quilowatts-hora cobrem os 32 kWh úteis com folga, e também os 30 kWh/dia da frota. O ponto não precisa ficar as 8 h no máximo: 32 / 6,34 ≈ 5,1 h bastariam para uma carga cheia neste circuito de 7,04 kW.

Erro comum a evitar. Esquecer o rendimento e declarar 7,04 × 8 = 56,3 kWh, que é a energia da rede, não a da bateria.

16.9. Corrente no cabo do carregador CC de 50 kW (Básico)

Enunciado. Um carregador CC entrega 50 kW a 400 V nos bornes do veículo (dado de exemplo). Qual é a corrente no cabo CC?

Conceito. Em corrente contínua, I = P / V. Essa corrente dimensiona cabo, conector e proteção do lado CC.

Fórmula. `I = P / V`

De onde vem. É a definição de potência elétrica em CC, P = V I.

Resolução

1. **Corrente.** I = 50 000 / 400 = 125 A.

Resposta. I = 125 A no cabo CC, a 400 V.

Interpretação. Cento e vinte e cinco ampères pedem cabo e conector bem mais robustos do que os 32 A do wallbox CA. Se a tensão do pacote cair a 288 V, como no exercício 15.10, a mesma potência pediria 174 A — outro motivo para o carregador acompanhar a tensão do pacote.

Erro comum a evitar. Usar 50 kW / 400 V = 0,125 A, esquecendo de passar a potência para watts.

16.10. Ponto trifásico de 22 kW (Básico)

Enunciado. Qual corrente, por fase, um ponto trifásico de 22,0 kW pede em 380 V, com fator de potência unitário? Compare com os 32 A do exercício 16.2.

Conceito. Isola-se a corrente da fórmula trifásica: I = P / (√3 V). O valor se compara com a capacidade do circuito de 32 A.

Fórmula. `I = P / (√3 V)`

De onde vem. É a inversão de P = √3 V I, já usada no exercício 16.2.

Resolução

1. **Corrente.** I = 22 000 / (1,732 × 380) = 22 000 / 658,2 = 33,4 A, um pouco acima dos 32 A.

Resposta. I = 33,4 A por fase, um pouco acima dos 32 A do exercício 16.2.

Interpretação. O ‘22 kW’ comercial costuma assumir 400 V × 32 A × √3 ≈ 22,2 kW. Em 380 V, 32 A entregam só 21,06 kW. Para de fato ter 22 kW a 380 V, o circuito precisa ir a cerca de 34 A, ou a tensão precisa ser 400 V.

Erro comum a evitar. Calcular I = 22 000 / 380 = 57,9 A, esquecendo o √3, ou usar 22 kW / 21,06 kW × 32 A de cabeça e arredondar sem a conta.

16.11. Taper na última fração da carga CC (Intermediário)

Enunciado. Repita a carga 20–80 % do exercício 16.1 no CC de 50 kW (η = 0,95) e depois continue até 100 %. Na janela 80–100 %, a potência média cai à metade (modelo ilustrativo de taper). Qual é o tempo total 20–100 %?

Conceito. A primeira janela permanece à potência cheia. A última fração tem metade da potência na bateria, então o mesmo quinhão de energia leva o dobro do tempo. Soma-se os dois trechos.

Fórmula. `t = E_1 / (P η) + E_2 / (P η / 2)`

De onde vem. É o exercício 16.1 em dois patamares de potência, uma aproximação degrau do taper real, que é contínuo.

Resolução

1. **Primeiro trecho.** E_1 = 19,2 kWh, P_bat = 47,5 kW, t_1 = 19,2 / 47,5 = 0,404 h = 24 min.
2. **Segundo trecho e total.** E_2 = 0,20 × 32,0 = 6,4 kWh, P_bat = 23,75 kW, t_2 = 6,4 / 23,75 = 0,269 h = 16 min. Total: 24 + 16 = 40 min.

Resposta. t = 40 min de 20 % a 100 %, sendo 24 min até 80 % e 16 min no taper.

Interpretação. Os últimos 20 % levam 16 min, quase o mesmo tempo dos 60 % anteriores. Por isso muita gente recarrega só até 80 % no eletroposto e deixa o topo da carga para a tomada de casa.

Erro comum a evitar. Aplicar o taper à janela inteira, ou somar 24 min com 24 / 2 = 12 min, esquecendo que a energia do segundo trecho é 6,4 kWh e não a metade de 19,2 kWh.

16.12. Pico se toda a frota ligar ao mesmo tempo (Intermediário)

Enunciado. Os dez veículos do exercício 16.3 ligam ao mesmo tempo em pontos monofásicos de 7,04 kW. Qual é a potência de pico da instalação? Compare com os 37,5 kW médios da janela de 8 h.

Conceito. O pico é o número de pontos vezes a potência de cada um, se todos partirem juntos. A média continua sendo a energia diária dividida pelo tempo disponível.

Fórmula. `P_pico = N P_ponto, P_méd = E_dia / t`

De onde vem. O pico é um instante; a média é um balanço no período. A relação entre os dois é o fator de simultaneidade.

Resolução

1. **Pico e comparação.** P_pico = 10 × 7,04 = 70,4 kW. A média continua 37,5 kW. O pico é 70,4 / 37,5 = 1,88 vez a média.

Resposta. P_pico = 70,4 kW, 1,88 vez os 37,5 kW médios.

Interpretação. A instalação precisa ser dimensionada para o pico, ou ter um gerente de carga que limite a simultaneidade. Sem isso, um transformador pensado nos 37,5 kW médios pode saturar quando os dez veículos chegam juntos às 18 h.

Erro comum a evitar. Declarar o pico igual à média de 37,5 kW, ou multiplicar 10 × 30 kWh e tratar o resultado como potência.

16.13. Queda de tensão no ramal monofásico (Intermediário)

Enunciado. O ramal monofásico de 32 A tem 50 m de cabo de cobre de 4 mm² (dados de exemplo, resistividade 0,0178 Ω·mm²/m). Qual é a queda de tensão de ida e volta a 32 A, em 220 V? A queda percentual passa de 4 %?

Conceito. A resistência do ramal é ρ vezes o comprimento elétrico (ida e volta) dividida pela seção. A queda é R I. O critério ilustrativo de 4 % compara ΔV / V.

Fórmula. `R = ρ (2 L) / S, ΔV = R I`

De onde vem. É a lei de Ohm no cabo, com o comprimento dobrado porque a corrente vai e volta pelo mesmo tipo de condutor.

Resolução

1. **Resistência.** R = 0,0178 × (2 × 50) / 4 = 0,0178 × 25 = 0,445 Ω.
2. **Queda e percentual.** ΔV = 0,445 × 32 = 14,2 V. ΔV / V = 14,2 / 220 = 6,5 %, acima de 4 %.

Resposta. ΔV = 14,2 V (6,5 %), acima do critério ilustrativo de 4 %.

Interpretação. Cinquenta metros em 4 mm² já são longos para 32 A contínuos. Subir a seção para 6 mm² reduziria a queda a 9,5 V (4,3 %), ainda no limite; 10 mm² cairia a 5,7 V (2,6 %). A queda também reduz a potência no wallbox.

Erro comum a evitar. Usar só os 50 m (sem a volta), obtendo 7,1 V e 3,2 %, e concluir que passa nos 4 %.

16.14. Casa versus eletroposto, mesma janela (Intermediário)

Enunciado. A janela 20–80 % pede 21,3 kWh da rede em casa (exercício 16.6, η = 0,90, R$ 0,80 / kWh) e 20,2 kWh no eletroposto CC (η = 0,95). Se o eletroposto cobrar R$ 2,20 / kWh (tarifa de exemplo), qual é o custo em cada caso?

Conceito. O custo é a energia retirada daquele ponto vezes a tarifa local. A comparação já inclui o rendimento, porque as energias vieram do exercício 16.6.

Fórmula. `C = E_rede p`

De onde vem. É a mesma definição de custo do exercício 16.3, aplicada a duas tarifas e duas energias de rede.

Resolução

1. **Os dois custos.** Casa: C = 21,3 × 0,80 = R$ 17,04. Eletroposto: C = 20,2 × 2,20 = R$ 44,44.

Resposta. Casa: R$ 17,04. Eletroposto: R$ 44,44, nesta tarifa de exemplo.

Interpretação. O eletroposto sai mais que o dobro, mesmo pedindo um pouco menos de energia da rede. A diferença paga o tempo: 24 min contra quase 3 h. Para o dia a dia, a tomada de casa continua bem mais barata.

Erro comum a evitar. Aplicar as duas tarifas sobre os 19,2 kWh da bateria, ou trocar as tarifas entre casa e eletroposto.

16.15. Gerente de carga com no máximo dois pontos ligados (Intermediário)

Enunciado. A instalação da frota tem quatro pontos de 7,04 kW, mas um gerente de carga permite no máximo dois ligados ao mesmo tempo. Qual é o teto de potência? Os 300 kWh/dia do exercício 16.3 ainda cabem na janela de 8 h?

Conceito. O teto é dois pontos vezes 7,04 kW. A energia máxima na janela é esse teto vezes 8 h (energia da rede); com rendimento 0,90, chega menos à bateria. Compara-se com os 300 kWh úteis da frota.

Fórmula. `P_teto = n_sim P_ponto, E_bat^máx = P_teto t η`

De onde vem. O gerente limita a simultaneidade. A energia máxima é o produto do teto pelo tempo, já com o rendimento até a bateria.

Resolução

1. **Teto e energia máxima.** P_teto = 2 × 7,04 = 14,08 kW. E_bat^máx = 14,08 × 8 × 0,90 = 101 kWh, bem abaixo dos 300 kWh/dia.

Resposta. P_teto = 14,08 kW; E_bat^máx = 101 kWh em 8 h, não cobre os 300 kWh/dia.

Interpretação. Dois pontos de 7 kW são poucos para dez veículos que pedem 30 kWh cada. Para caber 300 kWh em 8 h com η = 0,90, o teto precisa ser 300 / (8 × 0,90) = 41,7 kW — cerca de seis pontos ligados ao mesmo tempo, ou pontos mais potentes.

Erro comum a evitar. Comparar 14,08 × 8 = 113 kWh da rede com 300 kWh, sem o rendimento, e ainda assim concluir que cabe.

16.16. Carga rápida de 150 kW, sem taper (Intermediário)

Enunciado. Um eletroposto de 150 kW, com rendimento 0,95, recarrega o up! de 10 % a 80 % da bateria de 32,0 kWh úteis, ainda sem taper. Qual é o tempo?

Conceito. A janela é 70 % de 32,0 kWh. A potência na bateria é 150 kW vezes 0,95. O tempo é a razão entre as duas, no mesmo modelo do exercício 16.1.

Fórmula. `t = (SOC_f − SOC_i) E_útil / (P η)`

De onde vem. É o balanço de energia a potência constante do exercício 16.1, só que com 150 kW e a janela 10–80 %, típica de parada rápida.

Resolução

1. **Energia e tempo.** E = 0,70 × 32,0 = 22,4 kWh. P_bat = 150 × 0,95 = 142,5 kW. t = 22,4 / 142,5 = 0,157 h = 9,4 min.

Resposta. t = 9,4 min, neste modelo sem taper.

Interpretação. Nove minutos e meio para 22,4 kWh é o teto teórico deste ponto de 150 kW. Na prática o pacote de 32 kWh, e o cabo, podem não aceitar 142 kW o tempo todo — o tempo real seria maior, como o taper do exercício 16.11 já mostrou em 50 kW.

Erro comum a evitar. Usar a janela 20–80 % (19,2 kWh) ou esquecer o rendimento e declarar 22,4 / 150 = 9,0 min.

16.17. Quantos pontos de 7,04 kW cabem em 75 kVA (Intermediário)

Enunciado. O ramal da frota tem um transformador de 75 kVA (dado de exemplo). Com fator de potência 1, quantos pontos monofásicos de 7,04 kW podem operar ao mesmo tempo, sem ultrapassar o transformador?

Conceito. Com fp = 1, 75 kVA equivalem a 75 kW. O número de pontos é a potência disponível dividida pela potência de cada um, arredondada para baixo.

Fórmula. `N = floor(S / P_ponto)`

De onde vem. É um limite de potência aparente. Com fp = 1, S e P coincidem.

Resolução

1. **Número de pontos.** N = 75 / 7,04 = 10,65, então no máximo 10 pontos simultâneos, usando 70,4 kW dos 75 kW.

Resposta. No máximo 10 pontos simultâneos (70,4 kW dos 75 kVA).

Interpretação. Dez pontos coincidem com a frota do exercício 16.3 e com o pico do exercício 16.12. A folga de 4,6 kW não chega para um décimo primeiro ponto. Se o fator de potência cair, cabem ainda menos.

Erro comum a evitar. Arredondar 10,65 para 11 pontos e estourar o transformador em 2,4 kW.

16.18. Perda no conector CC (Intermediário)

Enunciado. O conector e o cabo CC do exercício 16.9 têm uma resistência de contato de 2,0 mΩ no total (dado de exemplo). Qual é a perda Joule a 125 A? Ela é relevante diante dos 50 kW?

Conceito. A perda é $I^2 R$ no contato. Compara-se com a potência do ponto para ver se o rendimento do cabo é desprezível.

Fórmula. `P_Joule = I² R`

De onde vem. É a mesma perda Joule dos exercícios de bateria, agora no conector.

Resolução

1. **Perda e fração.** $P_{Joule} = 125^2 \times 0{,}0020 = 31{,}3$ W = 0,031 kW, ou 0,063 % dos 50 kW.

Resposta. $P_{Joule} = 31{,}3$ W, cerca de 0,063 % dos 50 kW — irrelevante para o rendimento, mas o contato precisa estar firme.

Interpretação. Trinta watts no conector não mudam o tempo de carga, mas aquecem o pino se o contato estiver ruim. Se R subir para 20 mΩ, a perda vai a 313 W e já vira um problema térmico no plugue.

Erro comum a evitar. Calcular 125 × 0,002 = 0,25 W, esquecendo o quadrado da corrente.

16.19. Tempo noturno com tarifa fora de ponta (Intermediário)

Enunciado. A janela fora de ponta vai das 22 h às 6 h (8 h). A carga 20–80 % do exercício 16.1 no CA de 7,4 kW leva 2 h 53 min. Se o veículo for ligado às 22 h, a que horas a janela 20–80 % termina, e quanto tempo ainda sobra na tarifa baixa?

Conceito. Soma-se a duração da carga à hora de início. A folga é a janela de 8 h menos o tempo de carga.

Fórmula. `hora_fim = hora_início + t, folga = t_janela − t`

De onde vem. É uma conta de relógio, com o tempo já obtido no exercício 16.1.

Resolução

1. **Término e folga.** 22 h + 2 h 53 min = 00 h 53 min. Folga = 8 h − 2 h 53 min = 5 h 07 min, ainda dentro da tarifa fora de ponta.

Resposta. A carga 20–80 % termina às 00 h 53 min, com 5 h 07 min de folga na tarifa fora de ponta.

Interpretação. Há folga de sobra para esta janela. Uma carga cheia de 4 h 48 min (exercício 16.5) terminaria às 02 h 48 min, ainda dentro das 6 h. O problema só aparece se o veículo for ligado bem depois das 22 h, ou se a potência for bem menor.

Erro comum a evitar. Somar 22 h com 2,88 h e declarar 24,88 h, sem converter 0,88 h em 53 min, ou esquecer que depois de 24 h o relógio volta a 00 h.

16.20. Wallbox trifásico de 22 kW na janela 20–80 % (Intermediário)

Enunciado. Com um ponto trifásico de 22,0 kW e rendimento 0,90, quanto tempo leva a janela 20–80 % da bateria de 32,0 kWh? Compare com as 2 h 53 min do CA de 7,4 kW.

Conceito. É de novo t = E / (P η), com E = 19,2 kWh. A comparação é a razão entre as duas potências efetivas.

Fórmula. `t = E / (P η)`

De onde vem. O mesmo balanço do exercício 16.1, agora com a potência do exercício 16.10.

Resolução

1. **Tempo e comparação.** P_bat = 22,0 × 0,90 = 19,8 kW. t = 19,2 / 19,8 = 0,970 h = 58 min, cerca de três vezes mais rápido do que 2 h 53 min.

Resposta. t = 58 min, cerca de três vezes mais rápido do que as 2 h 53 min em 7,4 kW.

Interpretação. Um wallbox de 22 kW deixa a janela 20–80 % em menos de uma hora, ainda em CA. É um meio-termo entre a tomada monofásica e o eletroposto de 50 kW (24 min), e cabe em muitos pátio de frota trifásicos.

Erro comum a evitar. Usar 21,06 kW no lugar de 22,0 kW sem o enunciado pedir, ou esquecer o rendimento e declarar 19,2 / 22 = 52 min.

16.21. Corrente aparente com fator de potência 0,95 (Desafio)

Enunciado. O wallbox de 7,4 kW monofásico em 220 V opera com fator de potência 0,95 (dado de exemplo). Qual é a potência aparente e a corrente eficaz? Essa corrente ainda passa em um disjuntor de 32 A?

Conceito. A potência aparente é P / fp. A corrente é S / V, maior do que P / V porque o fator de potência não é unitário.

Fórmula. `S = P / fp, I = S / V`

De onde vem. É a definição de fator de potência em regime senoidal: fp = P / S.

Resolução

1. **Potência aparente e corrente.** S = 7,4 / 0,95 = 7,79 kVA. I = 7 790 / 220 = 35,4 A, acima dos 32 A.

Resposta. S = 7,79 kVA; I = 35,4 A, não passa no disjuntor de 32 A.

Interpretação. Já no exercício 16.4 a corrente a fp = 1 era 33,6 A. Com fp = 0,95 ela sobe mais 1,8 A. Limitando o wallbox a 7,04 kW e exigindo fp próximo de 1, a instalação de 32 A volta a fechar as contas.

Erro comum a evitar. Calcular I = 7 400 / 220 = 33,6 A e ignorar o fator de potência, ou usar S = P × fp.

16.22. Recarga bidirecional de 10 kWh (Desafio)

Enunciado. O mesmo ponto CA de 7,4 kW, com rendimento 0,90 também no sentido inverso, devolve 10,0 kWh da bateria à rede (dado de exemplo, veículo-à-rede). Quanto tempo leva? Quanta energia sai de fato da bateria?

Conceito. A potência que chega à rede é P η. O tempo é a energia entregue à rede dividida por essa potência. A energia retirada da bateria é a da rede dividida pelo rendimento, ou P t.

Fórmula. `t = E_rede / (P η), E_bat = E_rede / η`

De onde vem. É o exercício 16.6 no sentido inverso: o rendimento volta a ‘comer’ uma fatia entre a bateria e a rede.

Resolução

1. **Tempo e energia da bateria.** P_rede = 7,4 × 0,90 = 6,66 kW. t = 10,0 / 6,66 = 1,50 h. E_bat = 10,0 / 0,90 = 11,1 kWh.

Resposta. t = 1 h 30 min; saem 11,1 kWh da bateria para entregar 10,0 kWh à rede.

Interpretação. Um quilowatt-hora se perde no caminho de volta. Somando a ida do exercício 16.6, a ida e volta ôhmica do carregador já come uma fatia visível — o veículo-à-rede precisa de tarifa e de casos de uso que paguem essa perda.

Erro comum a evitar. Declarar que saem só 10,0 kWh da bateria, ou calcular t = 10 / 7,4 = 1,35 h, sem o rendimento.

16.23. Fator de diversidade em vinte pontos (Desafio)

Enunciado. Um condomínio instala 20 pontos de 7,04 kW, mas aplica um fator de diversidade 0,40 (dado de exemplo, norma de demanda). Qual é a demanda simultânea de projeto? Compare com a potência instalada.

Conceito. A potência instalada é o número de pontos vezes a potência de cada um. A demanda de projeto é essa potência vezes o fator de diversidade, que reconhece que nem todos os pontos ligam ao mesmo tempo.

Fórmula. `P_inst = N P, P_dem = F_div P_inst`

De onde vem. O fator de diversidade é um coeficiente de projeto de instalações, empírico, usado para não superdimensionar o ramal.

Resolução

1. **Instalada e demanda.** P_inst = 20 × 7,04 = 140,8 kW. P_dem = 0,40 × 140,8 = 56,3 kW.

Resposta. P_inst = 140,8 kW; demanda de projeto = 56,3 kW, com F_div = 0,40.

Interpretação. Cinquenta e seis quilowatts são bem mais do que os 37,5 kW médios da frota de dez veículos, e cabem em um transformador de 75 kVA. O risco é o fator 0,40 ficar otimista num dia em que muitos moradores chegam no mesmo horário — o gerente de carga do exercício 16.15 é o que garante o teto.

Erro comum a evitar. Aplicar o fator 0,40 sobre os 7,04 kW de um ponto só, ou confundir diversidade com rendimento e dividir 140,8 kW por 0,40.

16.24. Energia da rede para a frota, com perdas (Desafio)

Enunciado. A frota do exercício 16.3 pede 300 kWh/dia nas baterias. Com rendimento médio 0,90 até a bateria e tarifa R$ 0,80 / kWh, quanta energia a rede fornece e qual é o custo diário real? Compare com os R$ 240 calculados sem perda.

Conceito. A rede fornece a energia das baterias dividida pelo rendimento. O custo real usa essa energia maior. A diferença é o que se perde nos carregadores.

Fórmula. `E_rede = E_bat / η, C = E_rede p`

De onde vem. É o exercício 16.6 aplicado à frota inteira, e o 16.3 refeito com perda.

Resolução

1. **Energia e custo.** E_rede = 300 / 0,90 = 333 kWh/dia. C = 333 × 0,80 = R$ 267 / dia, R$ 27 a mais do que os R$ 240 sem perda.

Resposta. E_rede = 333 kWh/dia; C = R$ 267 / dia, R$ 27 acima dos R$ 240 sem perda.

Interpretação. Dez por cento de perda no carregador viram quase trinta reais por dia nesta frota. Em um mês de 22 dias úteis, são cerca de R$ 590 só de perda — motivo para escolher carregadores eficientes e não deixar o cabo fino esquentar, como no exercício 16.13.

Erro comum a evitar. Multiplicar 300 kWh por 0,90 e pagar R$ 216, como se a perda reduzisse a conta em vez de aumentá-la.

16.25. Teto de 50 kW na janela da frota (Desafio)

Enunciado. A concessionária limita a demanda da frota a 50 kW. Os 300 kWh/dia (energia nas baterias, η = 0,90) cabem em 8 h? E se a janela cair para 4 h? Qual é o tempo mínimo para caber no teto?

Conceito. A potência média na rede é E_rede / t = (E_bat / η) / t. Compara-se com o teto. O tempo mínimo é E_rede / P_teto.

Fórmula. `P_rede = E_bat / (η t), t_mín = E_bat / (η P_teto)`

De onde vem. É o balanço do exercício 16.3 com rendimento e com um teto contratado de demanda.

Resolução

1. **Em 8 h e em 4 h.** P_rede (8 h) = 333 / 8 = 41,7 kW, abaixo de 50 kW — cabe. Em 4 h: 333 / 4 = 83,3 kW, estoura o teto.
2. **Tempo mínimo.** t_mín = 333 / 50 = 6,67 h = 6 h 40 min.

Resposta. Em 8 h cabe (41,7 kW). Em 4 h não cabe (83,3 kW). O tempo mínimo no teto de 50 kW é 6 h 40 min.

Interpretação. O teto de 50 kW é folgado na noite inteira e apertado no fim da tarde. Se os veículos precisarem sair às 4 h de recarga, a frota tem de ou contratar mais demanda, ou reduzir o consumo do dia, ou escalonar a chegada.

Erro comum a evitar. Usar 300 kWh / 8 h = 37,5 kW outra vez, sem o rendimento, e concluir que 4 h também cabem (75 kW ainda acima de 50 kW, mas a conta já estaria errada no método).

16.26. Pátio com quatro pontos e dez veículos a 20 % (Desafio)

Enunciado. Dez veículos chegam com 20 % de SOC e precisam chegar a 80 % (19,2 kWh cada, 192 kWh no total) em 8 h. Há quatro pontos de 7,04 kW, η = 0,90, e um gerente que pode ligar os quatro ao mesmo tempo. A energia e o tempo fecham?

Conceito. A potência máxima na bateria é 4 × 7,04 × 0,90. A energia máxima em 8 h é essa potência vezes o tempo. O tempo mínimo para 192 kWh é a energia dividida pela potência máxima na bateria.

Fórmula. `P_bat = n P η, E_máx = P_bat t, t_mín = E / P_bat`

De onde vem. Combina o gerente de carga do exercício 16.15 com a janela 20–80 % do exercício 16.1, agora para dez veículos.

Resolução

1. **Capacidade da instalação.** P_bat = 4 × 7,04 × 0,90 = 25,3 kW. E_máx = 25,3 × 8 = 203 kWh, um pouco acima dos 192 kWh pedidos.
2. **Tempo mínimo.** t_mín = 192 / 25,3 = 7,58 h = 7 h 35 min, cabe nas 8 h, com pouca folga.

Resposta. E_máx = 203 kWh contra 192 kWh pedidos; t_mín = 7 h 35 min, cabe nas 8 h com pouca folga.

Interpretação. Quatro pontos de 7 kW dão conta desta janela 20–80 %, mas quase no limite. Se um ponto sair de operação, ou se o rendimento cair, a conta não fecha. Um quinto ponto, ou um trifásico de 22 kW no lugar de um monofásico, daria folga de verdade.

Erro comum a evitar. Calcular 4 × 7,04 × 8 = 225 kWh da rede e comparar com 192 kWh, esquecendo o rendimento, e achar que há folga de 33 kWh quando na bateria a folga é só 11 kWh.

16.27. Corrente no primário do transformador (Desafio)

Enunciado. O transformador de 75 kVA do exercício 16.17 é trifásico e tem primário em 13,8 kV (dado de exemplo). Qual é a corrente nominal por fase no primário? E no secundário em 380 V?

Conceito. Em trifásico, I = S / (√3 V). Aplica-se a mesma fórmula nos dois lados, cada um com a sua tensão.

Fórmula. `I = S / (√3 V)`

De onde vem. É a definição de potência aparente trifásica, já usada no exercício 16.10, agora nos dois enrolamentos.

Resolução

1. **Primário.** I_p = 75 000 / (1,732 × 13 800) = 75 000 / 23 900 = 3,14 A.
2. **Secundário.** I_s = 75 000 / (1,732 × 380) = 75 000 / 658 = 114 A.

Resposta. I_primário = 3,14 A em 13,8 kV; I_secundário = 114 A em 380 V.

Interpretação. O primário leva pouca corrente, típica de média tensão. O secundário, com 114 A, já pede barramento e proteção de baixa tensão bem dimensionados — é por esse lado que os dez pontos de 32 A do exercício 16.17 se ligam.

Erro comum a evitar. Dividir 75 kVA por 13,8 kV e declarar 5,4 A, esquecendo o √3, ou usar 75 000 / 380 = 197 A no secundário, também sem o √3.

16.28. O pacote aceita os 150 kW? (Desafio)

Enunciado. No exercício 15.21, o teto teórico ilustrativo do pacote foi I_máx = 1 120 A e cerca de 323 kW. Os 142,5 kW na bateria do exercício 16.16 passam nesse critério? Qual seria a corrente a 355,2 V?

Conceito. A corrente pedida é P_bat / V. Compara-se com o teto de 1 120 A e com os 323 kW. Se passar, o limitador é o eletroposto, não o pacote, neste modelo.

Fórmula. `I = P_bat / V`

De onde vem. É P = V I no pacote, confrontada com o teto teórico do exercício 15.21.

Resolução

1. **Corrente e comparação.** I = 142 500 / 355,2 = 401 A, bem abaixo de 1 120 A. A potência 142,5 kW também é menor do que 323 kW. Neste critério, o pacote aceita os 150 kW do eletroposto.

Resposta. I = 401 A, bem abaixo de 1 120 A; o pacote aceita os 142,5 kW neste critério ilustrativo.

Interpretação. O gargalo, neste número, é o eletroposto de 150 kW, não o teto teórico do pacote. Se a tensão cair a 288 V, a mesma potência pediria 495 A, ainda com folga em relação a 1 120 A. O taper e a temperatura podem limitar antes desse teto teórico, como já apareceu nos exercícios de bateria.

Erro comum a evitar. Dividir 150 kW, e não 142,5 kW, por 355,2 V (422 A), ou comparar 401 A com um teto de 225 A do exercício 15.3, que era só o ponto de 80 kW, não o máximo do pacote.

16.29. Custo por quilômetro, casa versus eletroposto (Desafio)

Enunciado. Com os custos do exercício 16.14 (R$ 17,04 em casa e R$ 44,44 no eletroposto) para repor 19,2 kWh úteis, e um consumo de 14,7 kWh/100 km, qual é o custo por quilômetro em cada caso?

Conceito. A autonomia recuperada é a energia da bateria dividida pelo consumo. O custo por quilômetro é o custo da recarga dividido por essa distância.

Fórmula. `d = E_bat / c, p_km = C / d`

De onde vem. Combina o custo do exercício 16.14 com o consumo de estrada já usado na disciplina de baterias (14,7 kWh/100 km).

Resolução

1. **Distância recuperada.** d = 19,2 / 0,147 = 131 km.
2. **Custo por quilômetro.** Casa: 17,04 / 131 = R$ 0,130 / km. Eletroposto: 44,44 / 131 = R$ 0,340 / km.

Resposta. d = 131 km; casa R$ 0,130 / km; eletroposto R$ 0,340 / km.

Interpretação. Em casa o quilômetro fica no mesmo ordem do exercício 15.23 (cerca de R$ 0,13 / km). No eletroposto, o quilômetro sai quase três vezes mais caro, nesta tarifa de exemplo — razoável para uma viagem, caro para o deslocamento diário.

Erro comum a evitar. Dividir o custo por 19,2 kWh e declarar R$/kWh, sem passar pelo consumo em kWh/km, ou usar 14,7 kWh como se fosse o consumo de 1 km.

16.30. Síntese: da tomada ao pátio (Desafio)

Enunciado. Reúna, para a bateria de 32,0 kWh e a janela 20–80 % (19,2 kWh, η CA = 0,90 e η CC = 0,95, sem taper), os tempos em 7,4 kW, 22 kW e 50 kW, e diga se os 300 kWh/dia da frota de dez veículos cabem em 8 h num teto de 50 kW na rede.

Conceito. Os tempos vêm de t = 19,2 / (P η), já calculados. A frota cabe se a potência média na rede, 333 kWh / 8 h, for menor do que 50 kW — resultado do exercício 16.25.

Fórmula. `t = E / (P η), P_rede = E_frota / (η t_janela)`

De onde vem. É o fecho da disciplina: o exercício 16.1, o 16.20 e o 16.25 numa só leitura de projeto.

Resolução

1. **Os três tempos.** 7,4 kW: 2 h 53 min (exercício 16.1). 22 kW: 58 min (exercício 16.20). 50 kW: 24 min (exercício 16.1).
2. **A frota no teto.** P_rede = 300 / (0,90 × 8) = 41,7 kW, abaixo de 50 kW: a frota cabe na noite, neste teto.

Resposta. Tempos: 2 h 53 min em 7,4 kW, 58 min em 22 kW e 24 min em 50 kW, sem taper. A frota de 300 kWh/dia pede 41,7 kW médios na rede e cabe no teto de 50 kW em 8 h.

Interpretação. Esta disciplina fecha assim: o ponto certo depende do tempo que se tem, e o pátio certo depende da energia do dia e do teto contratado. Os números do up! cabem numa noite com 50 kW de demanda; o que muda, de um projeto para outro, é a simultaneidade e o rendimento.

Erro comum a evitar. Repetir os tempos sem o rendimento, ou concluir que a frota pede 300 / 8 = 37,5 kW na rede, esquecendo os 0,90 do carregador.

Redes Veiculares e ADAS (12 h)

17.1. Carga de um barramento CAN (Básico)

Enunciado. Quatro unidades eletrônicas enviam, cada uma, 100 quadros por segundo em um CAN de 500 kbit/s. Cada quadro tem 130 bits (dados de exemplo, já com bit stuffing médio). Qual é o tempo de um quadro e a carga do barramento?

Conceito. O tempo de um quadro é o número de bits dividido pela taxa do barramento. A carga é o número total de bits enviados por segundo, dividido pela mesma taxa.

Fórmula. `t_quadro = L / R, carga = N n L / R`

De onde vem. São definições de duração de quadro e de utilização de um canal digital a taxa constante, sem colisão nem retransmissão neste modelo.

Resolução

1. **Tempo do quadro.** t_quadro = 130 / 500 000 = 260 µs.
2. **Carga.** Bits por segundo = 4 × 100 × 130 = 52 000 bit/s. Carga = 52 000 / 500 000 = 0,104 = 10,4 %.

Resposta. t_quadro = 260 µs; carga = 10,4 %.

Interpretação. Dez por cento é uma carga folgada para um CAN clássico, que costuma ser projetado abaixo de 30 % a 50 % para deixar margem a picos e a retransmissões. O quadro de 260 µs é curto diante dos 200 ms de latência do exercício 17.3 — o atraso deste enunciado não está no fio, está no processamento e na atuação.

Erro comum a evitar. Dividir 130 bits por 500 kbit/s e declarar 0,26 s, esquecendo que 500 kbit/s é 500 000 bit/s, ou calcular a carga com uma só ECU (2,6 %).

17.2. Responsabilidade nos níveis SAE de automação (Básico)

Enunciado. Segundo a classificação SAE J3016, quem está no comando em cada nível, de 0 a 5? Em que nível o sistema passa a conduzir e a pedir a retomada ao motorista, e em que níveis ele é responsável pelo domínio ou pela condução em geral?

Conceito. Nos níveis 0 a 2 o motorista permanece no comando (o 2 já combina direção e pedais, mas exige atenção o tempo todo). No 3 o sistema conduz e pode pedir a retomada. Nos níveis 4 e 5 o sistema é responsável, no domínio de operação (4) ou em geral (5).

Fórmula. `nível 0–2: motorista; 3: sistema + retomada; 4–5: sistema`

De onde vem. É o resumo usual da SAE J3016, usado em ADAS e em veículos autônomos, sem entrar no detalhe de cada função.

Resolução

1. **Níveis 0 a 2.** O motorista está no comando. No nível 2 o sistema já combina direção e pedais, mas o motorista precisa permanecer atento e pronto para intervir.
2. **Nível 3.** O sistema conduz no domínio e pede a retomada quando chega no limite. O motorista não precisa olhar o tempo todo, mas precisa retomar quando solicitado.
3. **Níveis 4 e 5.** O sistema é responsável: no nível 4, dentro do domínio de operação; no 5, em geral, sem depender desse domínio.

Resposta. Níveis 0 a 2: motorista no comando (o 2 já combina direção e pedais, mas exige atenção). Nível 3: o sistema conduz e pede a retomada. Níveis 4 e 5: o sistema é responsável, no domínio (4) ou em geral (5).

Interpretação. A virada qualitativa é entre o 2 e o 3: até o 2, o motorista é o responsável, mesmo com as mãos e os pés ‘ajudados’. A partir do 3, a responsabilidade de conduzir no domínio passa ao sistema, com ou sem pedido de retomada. O gráfico do simulador é só didático — a norma não define essa porcentagem.

Erro comum a evitar. Colocar o nível 2 como ‘o sistema conduz sozinho’, ou tratar o nível 3 como autonomia completa, sem pedido de retomada.

17.3. Espaço percorrido durante a latência (Básico)

Enunciado. A 80 km/h, quanto espaço o veículo percorre durante uma latência de 200 ms entre o evento e a atuação (dados de exemplo)?

Conceito. O espaço é a velocidade vezes o tempo de latência, com a velocidade em metros por segundo. Nesse intervalo o veículo ainda não começou a frear nem a desviar.

Fórmula. `s_L = v t_L, v = V / 3,6`

De onde vem. É o movimento retilíneo uniforme no curto intervalo em que o sistema ainda não atuou. A divisão por 3,6 converte km/h em m/s.

Resolução

1. **Velocidade e espaço.** v = 80 / 3,6 = 22,22 m/s. s_L = 22,22 × 0,200 = 4,44 m.

Resposta. s_L = 4,44 m a 80 km/h, em 200 ms.

Interpretação. Quatro metros e meio são mais do que o comprimento do up!. Antes de o freio começar a atuar, o carro já andou isso. Por isso latência de percepção e de rede entra direto no cálculo de distância de parada dos ADAS.

Erro comum a evitar. Multiplicar 80 km/h por 0,200 s e declarar 16 m, sem converter para m/s, ou usar 200 s no lugar de 200 ms.

17.4. O mesmo atraso a 120 km/h (Básico)

Enunciado. Repita o exercício 17.3 a 120 km/h, com a mesma latência de 200 ms. Qual é o espaço percorrido?

Conceito. O espaço cresce na proporção da velocidade, porque o tempo de latência é o mesmo.

Fórmula. `s_L = v t_L`

De onde vem. É o mesmo movimento retilíneo uniforme do exercício 17.3, só com outra velocidade.

Resolução

1. **Velocidade e espaço.** v = 120 / 3,6 = 33,33 m/s. s_L = 33,33 × 0,200 = 6,67 m.

Resposta. s_L = 6,67 m a 120 km/h, em 200 ms.

Interpretação. A 120 km/h o veículo anda 50 % mais do que os 4,44 m do exercício 17.3, no mesmo atraso. Em rodovia, cada milissegundo a mais de latência vale mais metro do que na cidade.

Erro comum a evitar. Triplicar 4,44 m porque 120 / 80 parece ‘quase o dobro e um pouco’, ou esquecer a conversão e declarar 24 m.

17.5. Latência máxima para 2,0 m (Básico)

Enunciado. Se o projeto de um ADAS admite no máximo 2,00 m de espaço de latência a 80 km/h, qual é o maior atraso permitido entre o evento e a atuação?

Conceito. Isola-se o tempo: t_L = s_L / v. O resultado é o teto de latência do sistema de percepção, rede e atuação somados.

Fórmula. `t_L = s_L / v`

De onde vem. É a inversão do exercício 17.3.

Resolução

1. **Tempo máximo.** v = 22,22 m/s. t_L = 2,00 / 22,22 = 0,090 s = 90 ms.

Resposta. t_L = 90 ms, a 80 km/h, para no máximo 2,00 m.

Interpretação. Noventa milissegundos é bem menos do que os 200 ms do exercício 17.3. O quadro CAN de 260 µs continua irrelevante; o orçamento vai quase todo para câmera, radar, fusão e atuador.

Erro comum a evitar. Calcular 2,00 / 80 = 0,025 s = 25 ms, sem converter a velocidade para m/s.

17.6. Motorista a 1,5 s versus sistema a 200 ms (Básico)

Enunciado. A 80 km/h, compare o espaço percorrido no tempo de reação típico de um motorista atento, 1,5 s, com o espaço da latência de 200 ms do exercício 17.3 (dados de exemplo).

Conceito. Os dois espaços são v vezes o respectivo tempo. A diferença é o que o ADAS ‘ganha’ só por reagir mais rápido, ainda antes de o freio começar a atuar.

Fórmula. `s = v t`

De onde vem. É de novo o movimento retilíneo uniforme, agora com dois tempos de reação.

Resolução

1. **Os dois espaços.** v = 22,22 m/s. Motorista: s = 22,22 × 1,5 = 33,3 m. Sistema: 4,44 m. Diferença: 28,9 m.

Resposta. Motorista: 33,3 m. Sistema: 4,44 m. O ADAS ‘ganha’ 28,9 m só no tempo de reação.

Interpretação. Quase 29 m, cerca de sete carros, são o que um bom AEB pode economizar antes mesmo de o freio atuar. A distância de frenagem em si vem depois, e é a mesma se a desaceleração for a mesma — o ganho está em começar antes.

Erro comum a evitar. Usar 1,5 s e 200 s, ou somar os dois tempos no lugar de compará-los.

17.7. O mesmo tráfego em CAN a 1 Mbit/s (Básico)

Enunciado. Repita o exercício 17.1 em um CAN de 1 000 kbit/s, com os mesmos quatro ECUs, 100 quadros/s e 130 bits. Qual é o tempo de um quadro e a nova carga?

Conceito. Tempo e carga caem na razão inversa da taxa, porque o número de bits por segundo não muda.

Fórmula. `t_quadro = L / R, carga = N n L / R`

De onde vem. São as mesmas definições do exercício 17.1, só com o dobro da taxa.

Resolução

1. **Tempo e carga.** t_quadro = 130 / 1 000 000 = 130 µs. Carga = 52 000 / 1 000 000 = 5,2 %.

Resposta. t_quadro = 130 µs; carga = 5,2 %.

Interpretação. Dobrar a taxa corta o tempo e a carga pela metade. É o caminho clássico quando o barramento de 500 kbit/s começa a encher, antes de migrar para CAN FD ou Ethernet veicular.

Erro comum a evitar. Manter 260 µs e 10,4 %, como se a taxa não entrasse na conta, ou dobrar a carga no lugar de reduzi-la.

17.8. Espaço entre dois quadros de câmera (Básico)

Enunciado. Uma câmera de ADAS entrega 30 quadros por segundo (dado de exemplo). A 80 km/h, quanto o veículo anda entre um quadro e o seguinte?

Conceito. O período entre quadros é 1 / f. O espaço é a velocidade vezes esse período.

Fórmula. `T = 1 / f, s = v T`

De onde vem. É o período de uma amostragem uniforme, combinado com o movimento retilíneo uniforme.

Resolução

1. **Período e espaço.** T = 1 / 30 = 0,0333 s = 33,3 ms. s = 22,22 × 0,0333 = 0,741 m.

Resposta. T = 33,3 ms; s = 0,741 m entre quadros, a 80 km/h.

Interpretação. Quase três quartos de metro por quadro: um pedestre ou o para-choque da frente andam visivelmente de um frame para o outro. Subir para 60 fps cortaria esse espaço à metade, com o custo de mais processamento e mais banda.

Erro comum a evitar. Usar 30 ms no lugar de 33,3 ms, ou calcular 80 / 30 = 2,7 m, sem converter a velocidade.

17.9. Ciclo de controle de 10 ms (Básico)

Enunciado. Um controlador de freio ADAS roda a cada 10 ms (dado de exemplo). A 80 km/h, quanto o veículo anda em um ciclo?

Conceito. É outra vez s = v T, agora com o período da malha de controle, não da câmera.

Fórmula. `s = v T`

De onde vem. O mesmo cinemático do exercício 17.3, com T = 10 ms.

Resolução

1. **Espaço por ciclo.** s = 22,22 × 0,010 = 0,222 m.

Resposta. s = 0,222 m por ciclo de 10 ms, a 80 km/h.

Interpretação. Vinte e dois centímetros por ciclo é um passo fino diante dos 4,44 m de latência total. A malha de 10 ms não é o gargalo; o que pesa é o tempo até o primeiro comando chegar.

Erro comum a evitar. Calcular 80 km/h × 10 ms = 800 m, misturando unidades, ou usar 10 s no lugar de 10 ms.

17.10. Duração de um quadro Ethernet (Básico)

Enunciado. Uma câmera envia um quadro Ethernet de 1 500 bytes em uma rede de 100 Mbit/s (dados de exemplo). Qual é o tempo de transmissão do quadro? Compare com os 260 µs do CAN do exercício 17.1.

Conceito. O tempo é o número de bits do quadro dividido pela taxa. 1 500 bytes são 12 000 bits.

Fórmula. `t = (8 B) / R`

De onde vem. É a mesma definição de duração de quadro do exercício 17.1, agora em Ethernet, com o fator 8 que converte bytes em bits.

Resolução

1. **Tempo e comparação.** t = 12 000 / 100 000 000 = 120 µs, cerca de metade dos 260 µs do CAN, mas levando cerca de 90 vezes mais bits.

Resposta. t = 120 µs no Ethernet de 100 Mbit/s, contra 260 µs do quadro CAN de 130 bits.

Interpretação. O Ethernet leva um quadro bem maior em menos tempo, porque a taxa é 200 vezes a do CAN de 500 kbit/s. É por isso que câmera e lidar saem do CAN e vão para Ethernet veicular: o CAN não tem banda para vídeo.

Erro comum a evitar. Dividir 1 500 bytes por 100 Mbit/s sem multiplicar por 8, obtendo 15 µs, ou comparar 1 500 bits com 130 bits.

17.11. Carga com oito ECUs mais falantes (Intermediário)

Enunciado. O barramento CAN de 500 kbit/s agora tem oito ECUs, cada uma enviando 200 quadros por segundo de 130 bits (dados de exemplo). Qual é a carga? Ela passa de um teto ilustrativo de 50 %?

Conceito. A carga é de novo N n L / R. Compara-se com o teto de projeto de 50 %, deixado como margem para picos e retransmissões.

Fórmula. `carga = N n L / R`

De onde vem. É o exercício 17.1 com mais nós e o dobro da frequência de cada um.

Resolução

1. **Carga e teto.** Bits/s = 8 × 200 × 130 = 208 000 bit/s. Carga = 208 000 / 500 000 = 41,6 %, ainda abaixo de 50 %.

Resposta. Carga = 41,6 %, ainda abaixo do teto ilustrativo de 50 %.

Interpretação. Oito ECUs a 200 Hz já enchem quase metade do CAN clássico. Um nono nó no mesmo ritmo iria a 46,8 %; no décimo, a 52,0 %, estourando o teto. Aí entra o CAN de 1 Mbit/s do exercício 17.7, ou a divisão em dois barramentos.

Erro comum a evitar. Usar quatro ECUs a 100 / s outra vez (10,4 %), ou esquecer um dos fatores e declarar 20,8 %.

17.12. Quantos quadros cabem em 30 % de carga (Intermediário)

Enunciado. Com quadros de 130 bits em 500 kbit/s, quantos quadros por segundo o barramento admite se a carga de projeto for no máximo 30 %?

Conceito. Isola-se a frequência total: n_tot = carga × R / L. Esse é o teto somado de todos os nós.

Fórmula. `n_tot = carga R / L`

De onde vem. É a inversão da fórmula de carga do exercício 17.1.

Resolução

1. **Frequência máxima.** n_tot = 0,30 × 500 000 / 130 = 1 154 quadros/s.

Resposta. n_tot = 1 154 quadros/s no teto de 30 %.

Interpretação. Os 400 quadros/s do exercício 17.1 usam só um terço desse teto. Ainda cabem cerca de 750 quadros/s para novas funções, desde que a prioridade e o jitter sejam respeitados — carga média folgada não garante atrasos curtos em todo quadro.

Erro comum a evitar. Calcular 0,30 × 500 / 130 = 1,15 quadro/s, esquecendo que a taxa está em kbit/s, ou usar 10,4 % no lugar de 30 %.

17.13. Tempo até o alvo do radar (Intermediário)

Enunciado. Um radar de ADAS enxerga um obstáculo parado a 150 m, com o veículo a 80 km/h (dados de exemplo, velocidade relativa igual à do veículo). Qual é o tempo até a colisão, se ninguém frear?

Conceito. O tempo até a colisão (TTC) é a distância dividida pela velocidade de aproximação, enquanto a velocidade for constante.

Fórmula. `t_TTC = d / v`

De onde vem. É o movimento retilíneo uniforme em aproximação, o mesmo do exercício 17.3, agora com a distância do radar.

Resolução

1. **Tempo até a colisão.** v = 22,22 m/s. t_TTC = 150 / 22,22 = 6,75 s.

Resposta. t_TTC = 6,75 s, se a velocidade de 80 km/h se mantiver.

Interpretação. Seis segundos e três quartos é um tempo folgado para um AEB atuar, mas só se o obstáculo já estiver visível e o sistema confiar na medida. A 150 m a 120 km/h, o TTC cairia a 4,50 s.

Erro comum a evitar. Calcular 150 / 80 = 1,88 s, sem converter para m/s, ou usar 80 m/s no lugar de 22,22 m/s.

17.14. Distância de parada com latência e AEB (Intermediário)

Enunciado. A 80 km/h, o AEB tem latência de 200 ms e depois freia com 8,0 m/s² constantes (dados de exemplo). Qual é a distância total até parar, desde o instante do evento?

Conceito. A distância total é o espaço de latência, ainda em velocidade constante, mais a distância de frenagem $v^2 / (2a)$. Os dois trechos se somam.

Fórmula. $s = v\,t_L + v^2 / (2a)$

De onde vem. O primeiro termo é o exercício 17.3. O segundo é a desaceleração uniforme, a fórmula clássica de frenagem com v_f = 0.

Resolução

1. **Latência e frenagem.** s_L = 4,44 m. s_f = 22,22² / (2 × 8,0) = 493,8 / 16,0 = 30,9 m. s = 4,44 + 30,9 = 35,3 m.

Resposta. s = 35,3 m no total, sendo 4,44 m de latência e 30,9 m de frenagem.

Interpretação. A latência de 200 ms representa cerca de 13 % da distância total neste ponto. Em pista molhada, com a menor, a fração da latência cai, mas o total sobe — o ADAS precisa de mais espaço, não de menos tempo de cálculo só.

Erro comum a evitar. Somar 80 km/h × 0,2 s com $v^2 / 2a$ sem converter, ou esquecer o espaço de latência e declarar só 30,9 m.

17.15. Desaceleração mínima em 40 m (Intermediário)

Enunciado. O obstáculo está a 40,0 m, a velocidade é 80 km/h e a latência continua 200 ms. Qual é a menor desaceleração constante que ainda evita a colisão, neste modelo?

Conceito. Sobram 40,0 m menos os 4,44 m de latência para frear. Isola-se a de $s_f = v^2 / (2\,a)$.

Fórmula. $a = v^2 / (2\,(s - v\,t_L))$

De onde vem. É a inversão do exercício 17.14, com a distância total imposta pelo obstáculo.

Resolução

1. **Espaço de frenagem e a.** $s_f = 40{,}0 - 4{,}44 = 35{,}56$ m. $a = 22{,}22^2 / (2 \times 35{,}56) = 493{,}8 / 71{,}11 = 6{,}94$ m/s².

Resposta. $a = 6{,}94$ m/s², neste modelo com 40,0 m e 200 ms de latência.

Interpretação. Quase 0,71 g, um freio forte mas plausível em asfalto seco. Se a latência fosse 1,5 s do motorista, o espaço de frenagem cairia a 6,7 m e a pedida seria 37 m/s² — impossível. É o mesmo ganho de tempo do exercício 17.6, agora em desaceleração.

Erro comum a evitar. Usar $a = v^2 / (2 \times 40) = 6{,}17$ m/s², esquecendo de descontar os 4,44 m de latência, ou obter a negativa se s_L for maior do que 40 m.

17.16. Aproximação a 80 km/h contra 60 km/h (Intermediário)

Enunciado. O veículo da frente anda a 60 km/h e o de trás, a 80 km/h, ambos na mesma direção (dados de exemplo). Quanto o de trás se aproxima durante 200 ms de latência?

Conceito. O que importa é a velocidade relativa. O espaço de aproximação na latência é $(v_{trás} - v_{frente})\,t_L$.

Fórmula. $s_{rel} = (v_2 - v_1)\,t_L$

De onde vem. É o exercício 17.3 escrito na velocidade relativa, o referencial usual de um ACC ou de um AEB traseiro.

Resolução

1. **Velocidade relativa e espaço.** $v_{rel} = (80 - 60) / 3{,}6 = 5{,}56$ m/s. $s_{rel} = 5{,}56 \times 0{,}200 = 1{,}11$ m.

Resposta. $s_{rel} = 1{,}11$ m em 200 ms, nesta diferença de 20 km/h.

Interpretação. Um metro e onze é bem menos do que os 4,44 m contra um obstáculo parado. O AEB ‘traseiro’ em tráfego tem menos espaço relativo para fechar, mas também precisa de menos desaceleração para igualar as velocidades.

Erro comum a evitar. Usar 80 km/h no lugar da diferença, obtendo 4,44 m outra vez, ou subtrair depois de converter errado (80/3,6 − 60 = negativo).

17.17. Jitter de 50 ms no comando de freio (Intermediário)

Enunciado. Além da latência média de 200 ms, o comando de freio pode atrasar mais 50 ms (jitter de exemplo). A 80 km/h, quanto espaço a mais isso representa? Qual passa a ser o espaço total de latência no pior caso?

Conceito. O jitter entra como um acréscimo de tempo no pior caso. O espaço extra é v vezes esse acréscimo, e o total é v (t_L + t_j).

Fórmula. `s_j = v t_j, s_pior = v (t_L + t_j)`

De onde vem. É o exercício 17.3 com um atraso adicional, o jitter típico de uma fila no barramento ou no escalonador.

Resolução

1. **Extra e pior caso.** s_j = 22,22 × 0,050 = 1,11 m. s_pior = 4,44 + 1,11 = 5,56 m.

Resposta. s_j = 1,11 m; no pior caso, s = 5,56 m a 80 km/h.

Interpretação. Cinquenta milissegundos de jitter valem o mesmo 1,11 m da aproximação do exercício 17.16. Em ADAS, o projeto trabalha com o pior caso, não com a média — por isso a carga do CAN precisa de folga, para o jitter não crescer.

Erro comum a evitar. Somar 50 ms a 80 km/h sem converter, ou tratar o jitter como uma fração da latência (25 %) e multiplicar 4,44 m por 1,25, o que aqui até acerta o número, mas não é o método geral.

17.18. Distância de alerta com TTC de 3,0 s (Intermediário)

Enunciado. O alerta antecipado de colisão dispara quando o tempo até o alvo parado cai a 3,0 s (dado de exemplo). A 80 km/h, a que distância o alerta deve acionar?

Conceito. A distância de alerta é a velocidade vezes o TTC escolhido, enquanto a aproximação for uniforme.

Fórmula. `d_alerta = v t_TTC`

De onde vem. É a inversão do exercício 17.13, com o limiar de tempo imposto pelo projeto do alerta.

Resolução

1. **Distância de alerta.** d = 22,22 × 3,0 = 66,7 m.

Resposta. d_alerta = 66,7 m a 80 km/h, com TTC de 3,0 s.

Interpretação. Sessenta e sete metros é cerca de duas vezes a distância de parada do exercício 17.14 (35,3 m). O alerta dispara com folga para o motorista, e o AEB pode esperar um TTC menor para não frear cedo demais no tráfego.

Erro comum a evitar. Calcular 80 × 3 = 240 m, sem converter a velocidade, ou usar 3 ms no lugar de 3,0 s.

17.19. Bit stuffing de 20 % no quadro CAN (Intermediário)

Enunciado. Se o bit stuffing médio acrescentar 20 % aos 130 bits do exercício 17.1, qual passa a ser o tempo do quadro e a carga das quatro ECUs a 100 quadros/s em 500 kbit/s?

Conceito. O comprimento efetivo vira 1,20 L. Tempo e carga crescem na mesma proporção, porque a taxa do barramento não muda.

Fórmula. `L_ef = 1,20 L, t = L_ef / R, carga = N n L_ef / R`

De onde vem. O bit stuffing do CAN insere um bit oposto depois de cinco iguais, e o comprimento médio do quadro cresce. Os 130 bits do exercício 17.1 já incluíam um stuffing típico; aqui se estuda um acréscimo extra de 20 %, como pior caso didático.

Resolução

1. **Comprimento, tempo e carga.** L_ef = 1,20 × 130 = 156 bits. t = 156 / 500 000 = 312 µs. Carga = 4 × 100 × 156 / 500 000 = 12,5 %.

Resposta. L_ef = 156 bits; t = 312 µs; carga = 12,5 %.

Interpretação. A carga sobe de 10,4 % para 12,5 %, ainda folgada. O aviso é outro: o pior padrão de bits pode alongar o quadro, e o projeto de tempo real usa o comprimento máximo, não o médio do exercício 17.1.

Erro comum a evitar. Somar 20 bits (130 + 20 = 150) no lugar de 20 %, ou aplicar os 20 % sobre a carga e declarar 30,4 %.

17.20. Banda bruta de uma câmera de ADAS (Intermediário)

Enunciado. Uma câmera entrega 1 280 × 720 pixels, 24 bits por pixel e 30 fps, sem compressão (dados de exemplo). Qual é a taxa bruta em Mbit/s? Com compressão 10:1, essa taxa cabe em um Ethernet de 100 Mbit/s?

Conceito. A taxa bruta é largura vezes altura vezes bits por pixel vezes quadros por segundo. A compressão divide essa taxa pelo fator 10:1.

Fórmula. `R = W H b f, R_comp = R / k`

De onde vem. É o produto das dimensões de um vídeo digital progressivo, a definição usual de taxa de bits não comprimida.

Resolução

1. **Taxa bruta.** R = 1 280 × 720 × 24 × 30 = 663,6 × 10^6 bit/s = 664 Mbit/s.
2. **Com compressão.** R_comp = 664 / 10 = 66,4 Mbit/s, cabe no Ethernet de 100 Mbit/s, com folga de cerca de 34 Mbit/s.

Resposta. R = 664 Mbit/s brutos; com 10:1, 66,4 Mbit/s, cabe no Ethernet de 100 Mbit/s.

Interpretação. Sem compressão essa câmera não cabe nem em um Gigabit. Com 10:1, um link de 100 Mbit/s leva uma câmera; duas já apertam (132,8 Mbit/s). Por isso os veículos com várias câmeras migram para 1 Gbit/s e para links dedicados.

Erro comum a evitar. Esquecer os 24 bits e calcular 1 280 × 720 × 30 = 27,6 Mbit/s, ou declarar que 664 Mbit/s já cabem em 100 Mbit/s.

17.21. Latência de 20 ms em um link V2X (Desafio)

Enunciado. Um alerta veículo-a-veículo chega com latência de 20 ms (dado de exemplo de um link V2X). A 80 km/h, quanto espaço o veículo percorre nesse atraso? Compare com os 4,44 m dos 200 ms do exercício 17.3.

Conceito. O espaço continua v t_L. A comparação é a razão das latências, 20/200 = 1/10.

Fórmula. `s_L = v t_L`

De onde vem. É o exercício 17.3 com uma latência típica de comunicação direta, bem menor do que a cadeia completa percepção–atuação.

Resolução

1. **Espaço e comparação.** s_L = 22,22 × 0,020 = 0,444 m, dez vezes menos do que 4,44 m.

Resposta. s_L = 0,444 m em 20 ms, dez vezes menos do que os 4,44 m do exercício 17.3.

Interpretação. Menos de meio metro: o V2X pode avisar um evento que a câmera ainda não viu, com atraso quase desprezível na estrada. O ganho não substitui o AEB, mas antecipa o que está atrás de uma curva ou de um caminhão.

Erro comum a evitar. Usar 20 s no lugar de 20 ms, ou comparar 20 ms com 200 µs do quadro CAN, misturando escalas.

17.22. Orçamento de latência de um AEB (Desafio)

Enunciado. A cadeia de um AEB, em um orçamento ilustrativo, soma 50 ms de câmera, 30 ms de radar, 40 ms de fusão e decisão, 20 ms de rede e 20 ms de atuador. Qual é a latência total e o espaço a 80 km/h?

Conceito. Em série, os atrasos se somam. O espaço é v vezes essa soma, como no exercício 17.3.

Fórmula. `t_L = Σ t_i, s_L = v t_L`

De onde vem. É um orçamento de tempo clássico de sistemas em cadeia: cada estágio entrega o seu atraso, e o total é a soma se não houver paralelismo creditado.

Resolução

1. **Soma e espaço.** t_L = 50 + 30 + 40 + 20 + 20 = 160 ms. s_L = 22,22 × 0,160 = 3,56 m.

Resposta. t_L = 160 ms; s_L = 3,56 m a 80 km/h.

Interpretação. Cento e sessenta milissegundos já são melhores do que os 200 ms do enunciado original. Se câmera e radar rodarem em paralelo, os 50 ms e os 30 ms não se somam: o trecho de percepção cai para 50 ms, o total vai a 130 ms e o espaço, a 2,89 m.

Erro comum a evitar. Pegar só o maior atraso (50 ms) e ignorar o resto, ou multiplicar os cinco tempos no lugar de somá-los.

17.23. Folga temporal de um ACC (Desafio)

Enunciado. Um controle de cruzeiro adaptativo mantém 1,50 s de folga temporal atrás do veículo da frente (dado de exemplo). A 80 km/h, qual é a distância correspondente? Se o da frente frear forte, essa folga é maior ou menor do que a distância de parada do exercício 17.14 (35,3 m)?

Conceito. A distância de folga é v vezes o tempo de headway. Compara-se com a distância de parada já calculada, lembrando que os dois veículos freiam, então o que importa é a diferença de desaceleração, não parar no asfalto.

Fórmula. `d = v t_h`

De onde vem. O headway temporal é a definição usual de distância de segurança em ACC: um tempo constante, não um espaço constante.

Resolução

1. **Distância de folga.** d = 22,22 × 1,50 = 33,3 m, um pouco menor do que os 35,3 m do exercício 17.14.

Resposta. d = 33,3 m a 80 km/h, um pouco menor do que os 35,3 m de parada do exercício 17.14.

Interpretação. A comparação com 35,3 m é só um alarme: essa folga não bastaria para parar atrás de um muro. Contra um veículo que também freia, a distância que precisa ser ‘comida’ é bem menor, e 1,5 s é um valor típico de ACC. O headway cresce com a velocidade, o que o espaço fixo não faria.

Erro comum a evitar. Calcular 80 × 1,5 = 120 m, sem converter, ou concluir que o ACC é inseguro só porque 33,3 m < 35,3 m, esquecendo que o alvo também freia.

17.24. Tempo até encostar na faixa (Desafio)

Enunciado. A faixa tem 3,50 m e o veículo, 1,70 m de largura, começando centralizado (dados de exemplo). Se ele deriva 0,40 m/s para o lado, quanto tempo leva até a roda encostar na linha? Um aviso de saída de faixa com 400 ms de latência chega a tempo de um correção de 1,0 s?

Conceito. A folga lateral de cada lado é (largura da faixa − largura do veículo) / 2. O tempo até a linha é essa folga dividida pela velocidade lateral. A latência do aviso precisa caber nesse tempo, com folga para o motorista corrigir.

Fórmula. `y = (W_faixa − W_veíc) / 2, t = y / v_lat`

De onde vem. É movimento uniforme na direção lateral, um modelo simples de deriva constante, típico de um LDW didático.

Resolução

1. **Folga e tempo.** y = (3,50 − 1,70) / 2 = 0,90 m. t = 0,90 / 0,40 = 2,25 s.
2. **Cabe o aviso?.** Com 400 ms de latência e 1,0 s para corrigir, o orçamento é 1,40 s, menor do que 2,25 s: chega a tempo, com 0,85 s de folga.

Resposta. t = 2,25 s até a linha; o aviso de 400 ms mais 1,0 s de correção cabe, com 0,85 s de folga.

Interpretação. Dois segundos e um quarto parecem folgados, mas uma deriva de 0,80 m/s já cortaria o tempo à metade (1,13 s), e aí 1,40 s de orçamento não caberia. O LDW precisa ser rápido sobretudo quando a deriva é forte, não quando o carro ‘passeia’ devagar.

Erro comum a evitar. Usar a faixa inteira de 3,50 m no lugar da folga de 0,90 m, obtendo 8,8 s, ou esquecer de dividir por dois.

17.25. Quantos nós de 200 Hz cabem em 50 % (Desafio)

Enunciado. No CAN de 500 kbit/s e quadros de 130 bits, quantas ECUs a 200 quadros/s cabem sem ultrapassar 50 % de carga?

Conceito. Isola-se N de carga = N n L / R, e arredonda-se para baixo, como no transformador do exercício 16.17.

Fórmula. `N = floor(carga R / (n L))`

De onde vem. É a inversão do exercício 17.11, com o teto de 50 % imposto.

Resolução

1. **Número de ECUs.** N = 0,50 × 500 000 / (200 × 130) = 250 000 / 26 000 = 9,62, então no máximo 9 ECUs, com carga 9 × 200 × 130 / 500 000 = 46,8 %.

Resposta. No máximo 9 ECUs a 200 / s (carga 46,8 %). A décima iria a 52,0 % e estouraria o teto.

Interpretação. Nove nós falantes já são um CAN cheio, neste teto. Funções novas ou vão para outro barramento, ou baixam a frequência, ou migram para 1 Mbit/s, como no exercício 17.7, que dobraria a capacidade.

Erro comum a evitar. Arredondar 9,62 para 10 e estourar o teto, ou usar 100 quadros/s no lugar de 200 e declarar 19 ECUs.

17.26. Parada a 120 km/h com o mesmo AEB (Desafio)

Enunciado. Repita a distância de parada do exercício 17.14 a 120 km/h, com 200 ms de latência e 8,0 m/s². Qual é o total, e quanto disso é latência?

Conceito. A mesma soma s = v t_L + v² / (2 a), agora com v maior. A distância de frenagem cresce com o quadrado da velocidade; a de latência, só com a velocidade.

Fórmula. `s = v t_L + v² / (2 a)`

De onde vem. É o exercício 17.14 em velocidade de rodovia.

Resolução

1. **Os dois trechos.** v = 33,33 m/s. s_L = 33,33 × 0,200 = 6,67 m. s_f = 33,33² / 16,0 = 1 111 / 16,0 = 69,4 m. s = 6,67 + 69,4 = 76,1 m.

Resposta. s = 76,1 m, sendo 6,67 m de latência (8,8 %) e 69,4 m de frenagem.

Interpretação. O total mais que dobra em relação aos 35,3 m a 80 km/h, porque a frenagem vai com v². A fração da latência cai (de 13 % para 8,8 %), mas o espaço dela sobe de 4,44 m para 6,67 m. Em rodovia, o que mais pesa é conseguir 8 m/s² de fato, não cortar 50 ms no software.

Erro comum a evitar. Multiplicar 35,3 m por 120/80 = 1,5 e declarar 53,0 m, esquecendo que a frenagem não é linear com a velocidade.

17.27. Quantas câmeras cabem no Gigabit (Desafio)

Enunciado. Com a taxa comprimida de 66,4 Mbit/s por câmera do exercício 17.20, quantas câmeras cabem em um Ethernet veicular de 1 000 Mbit/s, deixando 20 % de folga para protocolos e outras mensagens?

Conceito. A banda útil é 80 % de 1 000 Mbit/s. O número de câmeras é essa banda dividida por 66,4 Mbit/s, arredondada para baixo.

Fórmula. `N = floor(0,80 R / R_cam)`

De onde vem. É um limite de banda, no mesmo espírito do teto de carga do CAN, agora em Ethernet de câmeras.

Resolução

1. **Banda útil e número.** Banda útil = 0,80 × 1 000 = 800 Mbit/s. N = 800 / 66,4 = 12,0, então 12 câmeras, usando 797 Mbit/s.

Resposta. N = 12 câmeras no Gigabit com 20 % de folga (797 Mbit/s dos 800 úteis).

Interpretação. Doze câmeras é um número típico de um veículo com visão 360°. Sem a folga de 20 %, caberiam 15 (996 Mbit/s), mas o link ficaria saturado e o jitter subiria. Na prática cada câmera pode ter um link dedicado — esta conta é o teto de um barramento compartilhado.

Erro comum a evitar. Dividir 1 000 por 66,4 e declarar 15 câmeras, esquecendo a folga de 20 %, ou usar a taxa bruta de 664 Mbit/s e concluir que cabe só uma.

17.28. Desaceleração pedida em apenas 20 m (Desafio)

Enunciado. A 80 km/h, com 200 ms de latência, o obstáculo surge a 20,0 m. Qual desaceleração constante o AEB precisaria depois da latência? Esse valor é plausível em asfalto seco (teto ilustrativo de 10 m/s²)?

Conceito. Sobram 20,0 m menos 4,44 m para frear. a = v² / (2 s_f). Compara-se com o teto de 10 m/s². Se s_f for curto demais, a colisão não se evita neste modelo.

Fórmula. `a = v² / (2 (s − v t_L))`

De onde vem. É o exercício 17.15 com um obstáculo bem mais perto.

Resolução

1. **Espaço e desaceleração.** s_f = 20,0 − 4,44 = 15,56 m. a = 493,8 / 31,11 = 15,9 m/s², acima do teto ilustrativo de 10 m/s². Neste modelo, não dá para evitar a colisão.

Resposta. a = 15,9 m/s², acima do teto de 10 m/s²; neste modelo a colisão não se evita.

Interpretação. Vinte metros a 80 km/h já são menos do que a frenagem sozinha (30,9 m). Mesmo com latência zero, a pedida seria 12,3 m/s², ainda acima do teto de 10 m/s². O AEB, neste caso, no máximo reduz a velocidade do impacto — e isso já vale, embora não evite o choque.

Erro comum a evitar. Usar 20,0 m inteiros na fórmula e declarar 12,3 m/s², ou concluir que 15,9 m/s² é ‘só 1,6 g’ e portanto fácil em pista seca.

17.29. Redundância de dois canais independentes (Desafio)

Enunciado. Dois canais independentes de um ADAS têm, cada um, probabilidade ilustrativa de falha silenciosa de 1,0 × 10^{-3} por hora. Se o sistema só falha quando os dois falham na mesma hora, qual é essa probabilidade conjunta?

Conceito. Com independência, a probabilidade conjunta é o produto das duas. A redundância reduz a falha na razão do produto, não da soma.

Fórmula. `P_conj = P_1 P_2`

De onde vem. É a regra do produto para eventos independentes, o modelo mais simples de redundância paralela.

Resolução

1. **Produto.** P_conj = (1,0 × 10^{-3}) × (1,0 × 10^{-3}) = 1,0 × 10^{-6} por hora.

Resposta. P_conj = 1,0 × 10^{-6} por hora, neste modelo de independência.

Interpretação. A falha conjunta cai mil vezes em relação a um canal só. O modelo é otimista: se a causa for comum (alimentação, calibração, software compartilhado), a independência cai por terra e o produto não vale. Redundância de verdade pede canais diversos, não só duplicados.

Erro comum a evitar. Somar $10^{-3} + 10^{-3} = 2 \times 10^{-3}$, que seria a probabilidade de pelo menos um falhar, não a dos dois ao mesmo tempo, ou multiplicar errado e declarar 10^{-9}.

17.30. Síntese: do barramento à distância de parada (Desafio)

Enunciado. Reúna, a 80 km/h: a carga do CAN do exercício 17.1, o espaço de 200 ms do exercício 17.3, a distância de parada do AEB do exercício 17.14 e a folga de 1,50 s do ACC do exercício 17.23. O quadro CAN de 260 µs é relevante diante dos 200 ms?

Conceito. Os quatro números já foram calculados. A comparação de 260 µs com 200 ms mostra em que camada está o atraso que ‘come’ estrada.

Fórmula. `s_L = v t_L, s = s_L + v² / (2 a)`

De onde vem. É o fecho da disciplina: rede, latência, AEB e ACC no mesmo ponto de 80 km/h.

Resolução

1. **Os quatro números.** Carga CAN: 10,4 %, quadro 260 µs. Espaço de latência: 4,44 m. Parada do AEB: 35,3 m. Folga do ACC: 33,3 m.
2. **O quadro é relevante?.** 260 µs / 200 ms = 0,13 %. O atraso do fio é desprezível diante da cadeia percepção–atuação.

Resposta. Carga 10,4 % e quadro 260 µs; s_L = 4,44 m; parada do AEB = 35,3 m; folga do ACC = 33,3 m. O quadro CAN vale 0,13 % dos 200 ms, e não é o gargalo.

Interpretação. Esta disciplina fecha assim: o barramento precisa de folga de carga para o jitter não crescer, mas o metro na estrada é comido pela latência de perceber e atuar, não pelo bit no fio. O AEB e o ACC se dimensionam em metros e em segundos, a 80 km/h e a 120 km/h, com as mesmas fórmulas.

Erro comum a evitar. Tratar os 260 µs como se fossem 260 ms e concluir que o CAN é o gargalo, ou somar 35,3 m com 33,3 m como se fossem trechos da mesma manobra.

Ensaios Dinamométricos (8 h)

18.1. Rendimento da roda à bateria a 100 km/h (Básico)

Enunciado. A 100 km/h, a força de rodagem do up! ilustrativo é 423,5 N e o motor pede 13,0 kW à bateria (dados de exemplo). Qual é o rendimento do conjunto, da bateria até a roda?

Conceito. A potência na roda é a força vezes a velocidade. O rendimento é essa potência dividida pela potência elétrica pedida à bateria.

Fórmula. `P_roda = F v, η = P_roda / P_el`

De onde vem. É a definição de rendimento de uma cadeia de potência, com P_roda = F v no movimento uniforme (a aceleração é nula e não há termo de inércia).

Resolução

1. **Potência na roda.** v = 100 / 3,6 = 27,78 m/s. P_roda = 423,5 × 27,78 = 11,76 kW.
2. **Rendimento.** η = 11,76 / 13,0 = 0,905 = 90,5 %.

Resposta. η = 90,5 %, com P_roda = 11,76 kW e P_el = 13,0 kW.

Interpretação. Noventa por cento e meio é um rendimento de cadeia (inversor, motor e transmissão) bem razoável a 100 km/h. Os 1,24 kW que faltam viram calor. O 13,0 kW na bateria equivalem a 13,0 kWh/100 km neste regime constante, o consumo que já apareceu em outras disciplinas.

Erro comum a evitar. Dividir 13,0 kW por 423,5 N e declarar um rendimento em unidades misturadas, ou esquecer de converter 100 km/h para m/s.

18.2. Força média em um coast-down 80–70 km/h (Básico)

Enunciado. Em um ensaio de coast-down, o up! ilustrativo (900 kg) cai de 80 km/h a 70 km/h em 8,8 s (dado de exemplo). Qual é a força média de rodagem? Compare com a força do modelo a 75 km/h, 285 N.

Conceito. A desaceleração média é a variação de velocidade dividida pelo tempo. A força média é a massa vezes essa desaceleração, se não houver outra força no eixo (ponto morto, ou o equivalente no dinamômetro).

Fórmula. `a_méd = Δv / Δt, F_méd = m a_méd`

De onde vem. É a segunda lei de Newton no coast-down, com a média do intervalo no lugar da força instantânea. A comparação com 285 N confere o modelo no centro do intervalo, 75 km/h.

Resolução

1. **Desaceleração e força.** Δv = 10 / 3,6 = 2,778 m/s. a_méd = 2,778 / 8,8 = 0,316 m/s². F_méd = 900 × 0,316 = 284 N.
2. **Comparar com o modelo.** O modelo a 75 km/h dá 285 N, uma diferença de cerca de 1 N (0,4 %). Os dois fecham.

Resposta. F_média ≈ 284 N; o modelo a 75 km/h dá 285 N, e os dois fecham.

Interpretação. Um segundo de coast-down, medido com relógio e velocímetro, já devolve a força de rodagem no intervalo. A diferença de 1 N é menor do que a incerteza típica do ensaio. Por isso o coast-down é o caminho clássico para achar os coeficientes do exercício 18.3.

Erro comum a evitar. Usar Δv = 10 m/s no lugar de 10 km/h, obtendo cerca de 1 023 N, ou esquecer a massa e declarar só a desaceleração.

18.3. Coeficientes de rodagem do up! ilustrativo (Básico)

Enunciado. Com m = 900 kg, f = 0,012, C_d = 0,32, A = 2,10 m², ρ = 1,225 kg/m³ e g = 9,81 m/s², calcule os coeficientes da força F = f_0 + f_1 v + f_2 v², com v em m/s, e o f_2 equivalente com a velocidade em km/h. Adote f_1 = 0 neste modelo.

Conceito. f_0 é a resistência de rolamento, m g f. f_2 é o coeficiente aerodinâmico, (1/2) ρ C_d A. O f_1, de termos viscosos, é nulo neste modelo. Para V em km/h, f_2 se divide por 3,6² = 12,96.

Fórmula. `f_0 = m g f, f_2 = (1/2) ρ C_d A`

De onde vem. É a decomposição clássica da força de rodagem em um termo constante e um termo em v², a mesma usada na dinâmica veicular do módulo 1.

Resolução

1. **f_0 e f_2 em m/s.** f_0 = 900 × 9,81 × 0,012 = 105,9 N. f_2 = 0,5 × 1,225 × 0,32 × 2,10 = 0,4116 N/(m/s)². f_1 = 0.
2. **f_2 em km/h.** f_2^km/h = 0,4116 / 12,96 = 0,0318 N/(km/h)².

Resposta. f_0 = 105,9 N; f_1 = 0; f_2 = 0,4116 N/(m/s)², ou 0,0318 N/(km/h)².

Interpretação. A 100 km/h, f_2 v² = 0,4116 × 27,78² = 317,6 N, o triplo do rolamento. É por isso que o consumo de estrada sobe forte com a velocidade, e o dinamômetro precisa acertar os dois termos, não só o rolamento de piso.

Erro comum a evitar. Esquecer o 1/2 em f_2 e declarar 0,823 N/(m/s)², ou dividir f_2 por 3,6 no lugar de 3,6² ao passar para km/h.

18.4. Força e potência na roda a 50 km/h (Básico)

Enunciado. Com os coeficientes do exercício 18.3, calcule a força de rodagem e a potência na roda a 50 km/h, em piso plano e vento nulo.

Conceito. A força é $f_0 + f_2 v^2$, com v em m/s. A potência na roda é F v, no movimento uniforme.

Fórmula. $F = f_0 + f_2 v^2$, $P = F v$

De onde vem. É a aplicação direta dos coeficientes do exercício 18.3, agora a 50 km/h, para comparar com os 423,5 N e 11,76 kW a 100 km/h.

Resolução

1. **Força.** v = 50 / 3,6 = 13,89 m/s. F = 105,9 + 0,4116 × 13,89² = 105,9 + 79,4 = 185,3 N.
2. **Potência.** P = 185,3 × 13,89 = 2,57 kW.

Resposta. F = 185,3 N; P_{roda} = 2,57 kW a 50 km/h.

Interpretação. A 50 km/h a potência na roda é cerca de 22 % da de 100 km/h (11,76 kW), não a metade: a parcela aerodinâmica cai com v^3. No dinamômetro, um erro em f_2 aparece pouco em baixa e muito em alta.

Erro comum a evitar. Usar 423,5 N também a 50 km/h, ou calcular $f_2 v^2$ com v em km/h sem o coeficiente 0,0318.

18.5. Potência elétrica a 50 km/h (Básico)

Enunciado. Admitindo o mesmo rendimento 90,5 % do exercício 18.1, qual potência a bateria precisa fornecer para manter 50 km/h, com P_{roda} = 2,57 kW?

Conceito. A potência elétrica é a da roda dividida pelo rendimento. O rendimento foi medido a 100 km/h e aqui se reutiliza como primeira aproximação.

Fórmula. $P_{el} = P_{roda} / \eta$

De onde vem. É a inversão do exercício 18.1, aplicada ao ponto de 50 km/h do exercício 18.4.

Resolução

1. **Potência na bateria.** P_{el} = 2,57 / 0,905 = 2,84 kW.

Resposta. P_{el} = 2,84 kW a 50 km/h, neste rendimento de 90,5 %.

Interpretação. Dois vírgula oitenta e quatro quilowatts são bem menos do que os 13,0 kW a 100 km/h. Em cidade, o consumo passa a ser dominado pelas paradas e pelas acelerações, que o regime constante deste exercício não captura — isso fica para a modelagem do ciclo, na disciplina seguinte.

Erro comum a evitar. Multiplicar 2,57 kW por 0,905 no lugar de dividir, obtendo 2,33 kW, menor do que a potência na roda.

18.6. Tempo de coast-down de 100 a 90 km/h (Básico)

Enunciado. Com a força do modelo no centro do intervalo, a 95 km/h, estime o tempo para o up! de 900 kg cair de 100 km/h a 90 km/h em coast-down. Use f_0 = 105,9 N e f_2 = 0,4116 N/(m/s)².

Conceito. Calcula-se F a 95 km/h e trata-se como constante no intervalo, como no exercício 18.2. O tempo é m Δv / F.

Fórmula. `F = f_0 + f_2 v_méd², t = m Δv / F`

De onde vem. É a inversão da segunda lei usada no exercício 18.2, agora com a força vinda do modelo, não do relógio.

Resolução

1. **Força a 95 km/h.** v = 95 / 3,6 = 26,39 m/s. F = 105,9 + 0,4116 × 26,39² = 105,9 + 286,6 = 392,5 N.
2. **Tempo.** Δv = 10 / 3,6 = 2,778 m/s. t = 900 × 2,778 / 392,5 = 6,37 s.

Resposta. t ≈ 6,37 s de 100 a 90 km/h, com F ≈ 392,5 N a 95 km/h.

Interpretação. O intervalo alto é mais curto do que os 8,8 s de 80–70 km/h, porque a força aerodinâmica é maior. No ensaio real, mede-se este tempo e confere-se o f_2: se o relógio der bem mais do que 6,4 s, o C_d ou a área estão superestimados.

Erro comum a evitar. Usar F = 423,5 N (a 100 km/h) o intervalo inteiro, ou Δv = 10 m/s, inflando o tempo ou a força.

18.7. Consumo em regime a 100 km/h (Básico)

Enunciado. Com P_el = 13,0 kW a 100 km/h (exercício 18.1), qual é o consumo da bateria em kWh/100 km neste regime constante? E a energia para rodar 100 km, na roda e na bateria?

Conceito. Em regime constante, rodar 100 km a 100 km/h leva 1,0 h, então o consumo em kWh/100 km coincide com a potência em kW. A energia na roda é 11,76 kWh; a da bateria, 13,0 kWh.

Fórmula. `c = P_el / v, E = c d`

De onde vem. É a definição de consumo específico, com v em km/h e P em kW: kW / (km/h) × 100 km = kWh/100 km.

Resolução

1. **Consumo e energias.** c = 13,0 kW / 100 km/h × 100 km = 13,0 kWh/100 km. Na roda: 11,76 kWh/100 km. Em 100 km: 11,76 kWh na roda e 13,0 kWh na bateria.

Resposta. 13,0 kWh/100 km na bateria e 11,76 kWh/100 km na roda, neste regime a 100 km/h.

Interpretação. O 13,0 kWh/100 km é o consumo de estrada em velocidade constante, um pouco abaixo do 14,7 kWh/100 km usado em outras disciplinas, que já inclui um rendimento de cadeia de 80 % e não os 90,5 % deste ensaio. Os dois números convivem: um é de dinamômetro a 100 km/h; o outro, uma hipótese mais conservadora de uso misto.

Erro comum a evitar. Dividir 13,0 kW por 100 km e declarar 0,13 kWh/km sem perceber que isso é o mesmo 13,0 kWh/100 km, ou usar 11,76 kW como consumo da bateria.

18.8. Força de um aclive de 5 % a 100 km/h (Básico)

Enunciado. O mesmo up! sobe um aclive de 5 % a 100 km/h (dado de exemplo; sen α ≈ tan α = 0,05). Qual é a força total (rodagem + declividade) e a potência na roda?

Conceito. A força de declividade é m g sen α, aproximada por m g × 0,05 em rampas pequenas. Soma-se à força de rodagem de 423,5 N. A potência é F_total v.

Fórmula. `F_i = m g sen α, P = (F + F_i) v`

De onde vem. É o termo de rampa da dinâmica veicular, somado à força já calculada no exercício 18.1.

Resolução

1. **Declividade e total.** F_i = 900 × 9,81 × 0,05 = 441,5 N. F_total = 423,5 + 441,5 = 865,0 N.
2. **Potência.** P = 865,0 × 27,78 = 24,0 kW na roda.

Resposta. F_i = 441,5 N; F_total = 865,0 N; P_roda = 24,0 kW a 100 km/h na rampa de 5 %.

Interpretação. A rampa de 5 % praticamente dobra a força e a potência na roda em relação ao plano. No dinamômetro, essa parcela se aplica como um offset de força, independente da velocidade, somado a f_0.

Erro comum a evitar. Usar m × 0,05 = 45 N, esquecendo g, ou somar 5 % a 423,5 N (21 N) no lugar de calcular m g sen α.

18.9. Conferência de f_2 com a área e o C_d (Básico)

Enunciado. Confira, com uma conta direta, que f_2 = 0,5 × 1,225 × 0,32 × 2,10 é de fato 0,4116 N/(m/s)². Se a área frontal for medida 5 % maior (2,205 m²), o que acontece com f_2 e com a força a 100 km/h?

Conceito. f_2 é proporcional à área. Um erro de 5 % em A vira 5 % em f_2 e 5 % só na parcela aerodinâmica da força, não em f_0.

Fórmula. `f_2 = (1/2) ρ C_d A, ΔF = Δf_2 v²`

De onde vem. É a definição do exercício 18.3, agora usada para um estudo de sensibilidade da medição de área.

Resolução

1. **Conferência.** 0,5 × 1,225 = 0,6125; × 0,32 = 0,1960; × 2,10 = 0,4116 N/(m/s)². Confere.
2. **Área 5 % maior.** f_2 = 0,4116 × 1,05 = 0,4322 N/(m/s)². ΔF a 100 km/h = 0,0206 × 27,78² = 15,9 N. A força total iria de 423,5 N para 439,4 N.

Resposta. f_2 confere: 0,4116 N/(m/s)². Com A 5 % maior, f_2 = 0,4322 e a força a 100 km/h sobe 15,9 N, para 439,4 N.

Interpretação. Quinze newtons a mais em 423,5 N são quase 4 % da força total, só por um erro de área. No dinamômetro isso vira consumo a mais. Por isso a área projetada e o C_d precisam ser medidos com o mesmo cuidado que o relógio do coast-down.

Erro comum a evitar. Aplicar os 5 % sobre os 423,5 N inteiros (21,2 N), incluindo o rolamento, que não depende da área.

18.10. Setpoint de força no dinamômetro (Básico)

Enunciado. O dinamômetro deve reproduzir a força de rodagem do exercício 18.3 em piso plano. Qual setpoint de força ele aplica a 50 km/h e a 100 km/h? Se o veículo acelerar a 0,50 m/s² a 50 km/h, que força extra de inércia entra, com m = 900 kg?

Conceito. O setpoint de rodagem é f_0 + f_2 v², já calculado: 185,3 N e 423,5 N. A inércia é m a e se soma quando há aceleração, no dinamômetro ou na rua.

Fórmula. `F_set = f_0 + f_2 v², F_inércia = m a`

De onde vem. O dinamômetro de chassi aplica a força de rodagem e, à parte, simula a inércia do veículo (rolos ou modelo de massa).

Resolução

1. **Setpoints.** A 50 km/h: 185,3 N (exercício 18.4). A 100 km/h: 423,5 N (exercício 18.1).
2. **Inércia.** F_inércia = 900 × 0,50 = 450 N, mais do que o dobro da rodagem a 50 km/h. A força total no eixo, nesse instante, seria 185,3 + 450 = 635 N.

Resposta. Setpoints: 185,3 N a 50 km/h e 423,5 N a 100 km/h. A inércia a 0,50 m/s² vale 450 N, e a força total a 50 km/h vai a 635 N.

Interpretação. Em aceleração, a inércia domina a rodagem em baixa velocidade. Um erro na massa equivalente do dinamômetro (m + inércia de rodas e rolos) aparece sobretudo nos transientes do ciclo, não no regime constante do exercício 18.1.

Erro comum a evitar. Somar a inércia também no setpoint de regime (a = 0), ou calcular m a com a em km/h.

18.11. Potência elétrica no aclive de 5 % (Intermediário)

Enunciado. Com P_roda = 24,0 kW no aclive de 5 % a 100 km/h (exercício 18.8) e o rendimento 90,5 % do exercício 18.1, qual potência a bateria precisa fornecer?

Conceito. A potência elétrica é de novo P_roda / η. O rendimento, medido no plano, é reutilizado como primeira aproximação também na rampa.

Fórmula. `P_el = P_roda / η`

De onde vem. É o exercício 18.5 aplicado ao ponto do exercício 18.8.

Resolução

1. **Potência na bateria.** P_el = 24,0 / 0,905 = 26,5 kW.

Resposta. P_el = 26,5 kW na rampa de 5 % a 100 km/h, neste rendimento.

Interpretação. A bateria entrega o dobro dos 13,0 kW do plano. Em um up! ilustrativo de 32 kWh úteis, essa rampa constante duraria 32 / 26,5 ≈ 1,2 h, ou uns 120 km — bem menos do que os 246 km de autonomia em uso mais manso. A rampa longa é um dos piores regimes para a autonomia.

Erro comum a evitar. Somar 5 % a 13,0 kW (13,65 kW) no lugar de recalcular a força de declividade, ou usar 24,0 kW como se já fosse a potência da bateria.

18.12. Erro de 0,2 s no cronômetro do coast-down (Intermediário)

Enunciado. No ensaio do exercício 18.2, o tempo medido de 8,8 s tiver um erro de +0,20 s (dado de exemplo). Qual força média resultaria, e qual é o erro em newtons e em porcentagem?

Conceito. A força média é m Δv / t, inversamente proporcional ao tempo. Um tempo maior subestima a força. O erro se compara aos 284 N do ensaio correto.

Fórmula. `F = m Δv / t, ε = (F_erro − F) / F`

De onde vem. É a mesma segunda lei do exercício 18.2, agora com um estudo de incerteza de medição do tempo.

Resolução

1. **Força com o tempo errado.** t = 9,00 s. F = 900 × 2,778 / 9,00 = 278 N.
2. **Erro.** ΔF = 278 − 284 = −6 N, ou −2,1 %. Um atraso de 0,20 s no relógio subestima a força em cerca de 2 %.

Resposta. F = 278 N com t = 9,00 s; erro de −6 N, ou −2,1 %, em relação aos 284 N.

Interpretação. Dois décimos de segundo em 8,8 s já deslocam a força em 2 %. O coast-down precisa de cronometragem fina (ou de um registrador de velocidade), de várias repetidas e de correção de vento, senão o f_2 herdado fica viesado.

Erro comum a evitar. Somar 0,20 s à força, ou calcular o erro como 0,20 / 8,8 = 2,3 % da força mas com o sinal invertido (tempo maior não aumenta a força).

18.13. Ar mais quente, massa específica menor (Intermediário)

Enunciado. Num dia quente a massa específica do ar cai de 1,225 para 1,180 kg/m³ (dado de exemplo). O que acontece com f_2 e com a força a 100 km/h, mantidos C_d e A?

Conceito. f_2 é proporcional a ρ. A parcela aerodinâmica cai na mesma razão; f_0 não muda. A força total cai só na diferença de F_a.

Fórmula. `f_2' = f_2 (ρ' / ρ), ΔF = (f_2' − f_2) v²`

De onde vem. É a definição de f_2 do exercício 18.3, com a densidade do ar como variável de ensaio.

Resolução

1. **Novo f_2.** f_2' = 0,4116 × (1,180 / 1,225) = 0,3965 N/(m/s)².
2. **Força a 100 km/h.** F_a' = 0,3965 × 27,78² = 305,9 N, contra 317,6 N. ΔF = −11,7 N. A força total cai de 423,5 N para 411,8 N.

Resposta. f_2 cai para 0,3965 N/(m/s)²; a força a 100 km/h cai 11,7 N, para 411,8 N.

Interpretação. Quase 12 N, ou 2,8 % da força total, só pela densidade do ar. Os procedimentos de ensaio corrigem o coast-down para uma densidade de referência, senão o mesmo carro ‘fica mais econômico’ num dia quente de céu aberto e ‘mais gastador’ num dia frio e denso.

Erro comum a evitar. Aplicar a razão 1,180 / 1,225 sobre os 423,5 N inteiros, reduzindo também o rolamento, que não depende do ar.

18.14. Quanto da força é rolamento e quanto é ar (Intermediário)

Enunciado. Com os números dos exercícios 18.1 e 18.4, qual é a fração da força de rodagem que vem do rolamento e da aerodinâmica, a 50 km/h e a 100 km/h?

Conceito. A parcela de rolamento é f_0 / F; a aerodinâmica é f_2 v² / F. As duas somam 100 % neste modelo com f_1 = 0.

Fórmula. `φ_rol = f_0 / F, φ_aero = f_2 v² / F`

De onde vem. É uma leitura das mesmas parcelas já calculadas, para ver como o ‘peso’ de cada termo muda com a velocidade.

Resolução

1. **A 50 km/h.** F = 185,3 N. Rolamento: 105,9 / 185,3 = 57,2 %. Ar: 79,4 / 185,3 = 42,8 %.
2. **A 100 km/h.** F = 423,5 N. Rolamento: 105,9 / 423,5 = 25,0 %. Ar: 317,6 / 423,5 = 75,0 %.

Resposta. A 50 km/h: 57,2 % rolamento e 42,8 % ar. A 100 km/h: 25,0 % rolamento e 75,0 % ar.

Interpretação. A 100 km/h o ar já leva três quartos da força. Reduzir C_d ou a área rende muito em estrada e pouco em cidade. Reduzir o rolamento (pneu, massa) rende o contrário. O dinamômetro precisa acertar os dois, porque o ciclo mistura os regimes.

Erro comum a evitar. Calcular as frações sobre 11,76 kW e 2,57 kW (potências), o que também é válido em regime, mas não era o que o enunciado pediu, ou trocar os percentuais entre 50 e 100 km/h.

18.15. Identificar f_0 e f_2 com dois pontos (Intermediário)

Enunciado. Um ensaio devolveu F = 185,3 N a 50 km/h e F = 423,5 N a 100 km/h, com f_1 = 0. Recupere f_0 e f_2 e confira com o exercício 18.3.

Conceito. Com dois pontos e f_1 nulo, f_2 é a diferença de força dividida pela diferença de v², e f_0 é F − f_2 v² em qualquer um dos pontos.

Fórmula. `f_2 = (F_2 − F_1) / (v_2² − v_1²), f_0 = F − f_2 v²`

De onde vem. É a identificação algébrica de uma reta F versus v², o método clássico de dois pontos (um coast-down em dois intervalos já permite o mesmo).

Resolução

1. **Diferença de v² e f_2.** v_100² = 27,78² = 771,6; v_50² = 13,89² = 192,9. Δv² = 578,7. f_2 = (423,5 − 185,3) / 578,7 = 238,2 / 578,7 = 0,4116 N/(m/s)².
2. **f_0.** f_0 = 423,5 − 0,4116 × 771,6 = 423,5 − 317,6 = 105,9 N, igual ao exercício 18.3.

Resposta. f_2 = 0,4116 N/(m/s)² e f_0 = 105,9 N, iguais aos do exercício 18.3.

Interpretação. Dois pontos de força bem medidos devolvem os dois coeficientes. Na prática se usam vários intervalos de coast-down e um ajuste por mínimos quadrados, porque um único par herda todo o erro do relógio e do vento.

Erro comum a evitar. Dividir a diferença de força pela diferença de velocidade, não de v², obtendo um ‘f_2’ em N/(m/s) sem sentido nesta fórmula.

18.16. Inércia equivalente dos rolos (Intermediário)

Enunciado. Os rolos do dinamômetro têm inércia rotativa J = 8,00 kg·m² e raio 0,300 m (dados de exemplo). Qual é a massa equivalente desses rolos? Se essa inércia não for compensada, o que acontece com o tempo de coast-down 80–70 km/h do exercício 18.2, com F = 284 N e m do veículo = 900 kg?

Conceito. A massa equivalente de um rolo é J / r², porque (1/2) J ω² = (1/2) (J / r²) v². No coast-down, a desaceleração passa a ser F / (m + m_eq), e o tempo cresce na mesma razão.

Fórmula. `m_eq = J / r², t = (m + m_eq) Δv / F`

De onde vem. É a equivalência energética entre rotação do rolo e translação do veículo, usada para ajustar a inércia simulada do dinamômetro.

Resolução

1. **Massa equivalente.** m_eq = 8,00 / 0,300² = 8,00 / 0,0900 = 88,9 kg.
2. **Tempo sem compensação.** t = (900 + 88,9) × 2,778 / 284 = 9,67 s, contra os 8,8 s do veículo sozinho — cerca de 10 % mais longo.

Resposta. m_eq = 88,9 kg; t = 9,67 s sem compensação, contra 8,8 s do veículo sozinho.

Interpretação. Oitenta e nove quilogramas são cerca de 10 % da massa do up!. Se o dinamômetro não descontar essa inércia (ou não a absorver no controle), o coast-down fica mais lento e a força de rodagem, subestimada — o mesmo tipo de viés do exercício 18.12, agora por uma massa a mais.

Erro comum a evitar. Calcular m_eq = J r² = 0,72 kg, invertendo a fórmula, ou somar 8 kg à massa de 900 kg, tratando J como se já fosse massa.

18.17. Vento de frente de 10 km/h a 100 km/h (Intermediário)

Enunciado. O veículo anda a 100 km/h em relação ao solo, mas há vento de frente de 10 km/h (dado de exemplo). Qual é a força aerodinâmica e a força total de rodagem? Qual potência na roda isso pede, ainda em regime?

Conceito. A força aerodinâmica usa a velocidade relativa do ar, 110 km/h, não a velocidade do solo. O rolamento continua com a velocidade do solo, mas aqui f_0 não depende dela. A potência na roda é F_total vezes a velocidade do solo, porque é essa a velocidade do ponto de contato.

Fórmula. `F_a = f_2 v_ar², P = (f_0 + F_a) v_solo`

De onde vem. O termo aerodinâmico depende do vento relativo; a potência no eixo, do produto da força pelo deslocamento do veículo em relação ao solo.

Resolução

1. **Forças.** v_ar = 110 / 3,6 = 30,56 m/s. F_a = 0,4116 × 30,56² = 384,3 N, contra 317,6 N sem vento. F_total = 105,9 + 384,3 = 490,2 N.
2. **Potência.** P = 490,2 × 27,78 = 13,62 kW na roda, 1,86 kW a mais do que 11,76 kW.

Resposta. F_a = 384,3 N; F_total = 490,2 N; P_roda = 13,62 kW, 1,86 kW acima do caso sem vento.

Interpretação. Dez quilômetros por hora de vento de frente, 10 % da velocidade, aumentam a parcela aerodinâmica em 21 % — porque ela vai com o quadrado da velocidade do ar. No dinamômetro, que em geral não tem vento, essa parcela precisa ser incluída no setpoint se o objetivo for um consumo ‘com vento de estrada’.

Erro comum a evitar. Somar 10 km/h à velocidade do solo também no cálculo da potência (P = F × 110 km/h), ou aplicar f_2 a 100 km/h e só depois acrescentar 10 % da força.

18.18. Energia de 100 km a 50 km/h (Intermediário)

Enunciado. Com P_roda = 2,57 kW e P_el = 2,84 kW a 50 km/h (exercícios 18.4 e 18.5), qual é a energia na roda e na bateria para rodar 100 km neste regime? Compare com os 11,76 kWh e 13,0 kWh a 100 km/h.

Conceito. O tempo para 100 km a 50 km/h é 2,0 h. A energia é a potência vezes esse tempo, ou o consumo específico vezes 100 km.

Fórmula. `E = P (d / v)`

De onde vem. É o mesmo balanço do exercício 18.7, no ponto de 50 km/h.

Resolução

1. **Tempo e energias.** t = 100 / 50 = 2,0 h. E_roda = 2,57 × 2,0 = 5,14 kWh. E_bat = 2,84 × 2,0 = 5,68 kWh, menos da metade dos valores a 100 km/h.

Resposta. E_roda = 5,14 kWh e E_bat = 5,68 kWh em 100 km a 50 km/h, menos da metade dos 11,76 kWh e 13,0 kWh a 100 km/h.

Interpretação. Andar a metade da velocidade não gasta a metade da energia: gasta cerca de 44 %, porque a parcela do ar cai mais do que o rolamento. O tempo, porém, dobra — este é um regime de consumo baixo e de viagem lenta, o oposto da rampa do exercício 18.11.

Erro comum a evitar. Usar 2,57 kWh e 2,84 kWh, esquecendo que a 50 km/h as 100 km levam duas horas, não uma.

18.19. Aclive de 5 % a 50 km/h (Intermediário)

Enunciado. Some a força de declividade de 441,5 N do exercício 18.8 à rodagem de 185,3 N a 50 km/h. Qual é a potência na roda e, com η = 90,5 %, a potência na bateria?

Conceito. A força total é a soma. A potência na roda é F_total vezes a velocidade de 50 km/h. A elétrica divide pelo rendimento.

Fórmula. `P_roda = (F + F_i) v, P_el = P_roda / η`

De onde vem. Combina os exercícios 18.4, 18.8 e 18.5 no mesmo ponto de 50 km/h.

Resolução

1. **Força e potências.** F_total = 185,3 + 441,5 = 626,8 N. P_roda = 626,8 × 13,89 = 8,71 kW. P_el = 8,71 / 0,905 = 9,62 kW.

Resposta. F_total = 626,8 N; P_roda = 8,71 kW; P_el = 9,62 kW a 50 km/h na rampa de 5 %.

Interpretação. A 50 km/h a rampa já é o termo dominante (441 N contra 185 N de rodagem). A potência na bateria, 9,62 kW, é bem menor do que os 26,5 kW da mesma rampa a 100 km/h: subir devagar economiza potência e, neste modelo, também energia, porque o tempo maior não chega a compensar a queda de potência aerodinâmica.

Erro comum a evitar. Reusar os 24,0 kW do exercício 18.8, esquecendo que a velocidade caiu à metade, ou somar 5 % a 2,84 kW.

18.20. Sensibilidade a um erro de 0,02 no C_d (Intermediário)

Enunciado. O C_d medido sai 0,34 no lugar de 0,32 (erro de +0,02, dado de exemplo). Qual é o novo f_2 e o acréscimo de força e de potência na roda a 100 km/h?

Conceito. f_2 é proporcional a C_d. O acréscimo de força é só na parcela aerodinâmica, (ΔC_d / C_d) × F_a, e a potência extra é esse acréscimo vezes a velocidade.

Fórmula. `f_2' = f_2 (C_d' / C_d), ΔP = ΔF v`

De onde vem. É a mesma sensibilidade do exercício 18.9, agora no coeficiente de arrasto, um dos parâmetros mais difíceis de cravar no ensaio de pista.

Resolução

1. **Novo f_2 e força.** f_2' = 0,4116 × (0,34 / 0,32) = 0,4373 N/(m/s)². ΔF = (0,4373 − 0,4116) × 27,78² = 19,8 N. F = 443,3 N.
2. **Potência extra.** ΔP = 19,8 × 27,78 = 0,55 kW na roda, cerca de 4,7 % dos 11,76 kW.

Resposta. f_2 = 0,4373 N/(m/s)²; ΔF = 19,8 N; ΔP = 0,55 kW a 100 km/h (cerca de 4,7 % da potência na roda).

Interpretação. Errar o C_d em 0,02 (6 % do valor) já desloca o consumo de estrada em quase 5 % na roda. É o mesmo ordem do erro de área do exercício 18.9 e do vento do exercício 18.17: o ensaio de rodagem é sensível, e o dinamômetro só reproduz bem o que a pista mediu bem.

Erro comum a evitar. Aplicar 0,02 / 0,32 sobre os 423,5 N inteiros, ou subtrair 0,02 de f_2 diretamente (0,4116 − 0,02).

18.21. Rendimento aparente com P_el medida a mais (Desafio)

Enunciado. No ensaio a 100 km/h do exercício 18.1, a força na roda continua 423,5 N, mas o analisador de potência lê 13,4 kW na bateria (dado de exemplo) no lugar de 13,0 kW. Qual passa a ser o rendimento aparente?

Conceito. O rendimento é P_roda / P_el, com P_roda inalterada. Um P_el maior reduz o rendimento aparente — pode ser perda real ou um viés de medição.

Fórmula. `η = P_roda / P_el`

De onde vem. É o exercício 18.1 com uma leitura elétrica diferente, o tipo de checagem que se faz quando dois instrumentos não fecham.

Resolução

1. **Rendimento aparente.** P_roda permanece 11,76 kW. η = 11,76 / 13,4 = 0,878 = 87,8 %, 2,7 pontos abaixo dos 90,5 %.

Resposta. η aparente = 87,8 %, 2,7 pontos abaixo dos 90,5 % do exercício 18.1.

Interpretação. Quatro décimos de quilowatt a mais na leitura elétrica, 3 % de 13,0 kW, derrubam o rendimento em quase três pontos. Antes de acusar o inversor, vale calibrar o analisador e conferir se os 423,5 N do dinamômetro também estão certos.

Erro comum a evitar. Calcular 13,4 / 13,0 = 103 % e tratar isso como rendimento, ou usar 13,4 kW como potência na roda.

18.22. Coast-down aproximado de 80 km/h até parar (Desafio)

Enunciado. Estime o tempo para o up! de 900 kg ir de 80 km/h a 0 em coast-down, tratando a força como constante e igual à do modelo a 40 km/h (o centro do intervalo). Use f_0 = 105,9 N e f_2 = 0,4116 N/(m/s)².

Conceito. É a mesma aproximação do exercício 18.6, agora num intervalo largo. A força no centro subestima a força no começo e superestima no fim, e o tempo é só uma ordem de grandeza, não um valor de ensaio.

Fórmula. `F = f_0 + f_2 v_méd², t = m v_0 / F`

De onde vem. A segunda lei com força constante, um primeiro palpite antes de integrar F(v). O resultado se compara com o ensaio, que seria mais lento no fim, quando F cai.

Resolução

1. **Força a 40 km/h e tempo.** v_méd = 11,11 m/s. F = 105,9 + 0,4116 × 11,11² = 105,9 + 50,8 = 156,7 N. t = 900 × 22,22 / 156,7 = 128 s, cerca de 2 min 8 s.

Resposta. t ≈ 128 s, ou 2 min 8 s, nesta aproximação de força constante a 40 km/h.

Interpretação. Dois minutos é só uma ordem de grandeza. No começo a força é uns 284 N (75–80 km/h) e no fim cai para perto de f_0 = 105,9 N, então o veículo demora mais do que 128 s para parar de fato. Para um número de ensaio, o certo é integrar ou somar vários intervalos como o do exercício 18.2.

Erro comum a evitar. Usar F = 284 N o tempo inteiro, obtendo cerca de 70 s, ou esquecer de converter 80 km/h e declarar t = 900 × 80 / 156,7.

18.23. Potência para acelerar a 0,50 m/s² a 50 km/h (Desafio)

Enunciado. No instante do exercício 18.10, a força total no eixo é 635 N (185,3 N de rodagem + 450 N de inércia) a 50 km/h. Qual é a potência na roda e, com η = 90,5 %, a potência na bateria?

Conceito. A potência na roda é a força total vezes a velocidade instantânea, mesmo em aceleração. A elétrica divide pelo rendimento, de novo como primeira aproximação.

Fórmula. `P_roda = F_total v, P_el = P_roda / η`

De onde vem. É P = F v no eixo, com a força já decomposta no exercício 18.10. A energia cinética crescente está incluída no termo m a.

Resolução

1. **Potências.** P_roda = 635 × 13,89 = 8,82 kW. P_el = 8,82 / 0,905 = 9,75 kW.

Resposta. P_roda = 8,82 kW; P_el = 9,75 kW, neste instante a 50 km/h e 0,50 m/s².

Interpretação. Nove vírgula setenta e cinco quilowatts para uma aceleração mansa a 50 km/h já superam os 2,84 kW do regime constante. No ciclo, são esses transientes que puxam o consumo de cidade para longe do número de regime do exercício 18.18.

Erro comum a evitar. Usar só as 450 N de inércia no cálculo da potência, ou calcular P = m a v com a em km/h.

18.24. Regime a 120 km/h (Desafio)

Enunciado. Com f_0 = 105,9 N e f_2 = 0,4116 N/(m/s)², calcule a força, a potência na roda e, com η = 90,5 %, a potência e o consumo na bateria a 120 km/h em regime no plano.

Conceito. As mesmas fórmulas dos exercícios 18.4 e 18.5, agora em velocidade de rodovia. O consumo em kWh/100 km é P_el / v × 100.

Fórmula. `F = f_0 + f_2 v², P_el = F v / η, c = P_el / v`

De onde vem. É a extrapolação do modelo de rodagem acima dos 100 km/h do ensaio de referência.

Resolução

1. **Força e potência na roda.** v = 33,33 m/s. F = 105,9 + 0,4116 × 33,33² = 105,9 + 457,3 = 563,2 N. P_roda = 563,2 × 33,33 = 18,77 kW.
2. **Bateria e consumo.** P_el = 18,77 / 0,905 = 20,74 kW. c = 20,74 / 120 × 100 = 17,3 kWh/100 km.

Resposta. F = 563,2 N; P_roda = 18,77 kW; P_el = 20,74 kW; c = 17,3 kWh/100 km a 120 km/h.

Interpretação. Em relação aos 13,0 kWh/100 km a 100 km/h, o consumo sobe 33 % para andar só 20 % mais rápido. É o v³ da potência do ar aparecendo no consumo de rodovia, e o motivo de o limite de velocidade pesar tanto na autonomia.

Erro comum a evitar. Multiplicar 13,0 kWh/100 km por 120/100 e declarar 15,6, esquecendo que a força também cresce com v².

18.25. Massa 10 % maior no coast-down e no regime (Desafio)

Enunciado. O veículo vai a 990 kg (+10 %), e o rolamento, proporcional à massa, também sobe 10 %. O que acontece com f_0, com a força a 100 km/h e com o tempo de coast-down 80–70 km/h, usando a força do modelo a 75 km/h? f_2 permanece 0,4116 N/(m/s)².

Conceito. f_0 novo é 1,10 × 105,9 N. A força a 75 e a 100 km/h ganha só esse acréscimo, porque o ar não depende da massa. O tempo de coast-down é m Δv / F, com massa e força as duas maiores.

Fórmula. `f_0' = 1,10 f_0, t = m' Δv / (f_0' + f_2 v_méd²)`

De onde vem. Combina a proporcionalidade do rolamento à massa com a segunda lei do exercício 18.2. A aerodinâmica fica constante.

Resolução

1. **f_0 e força a 100 km/h.** f_0' = 116,5 N. F_100 = 116,5 + 317,6 = 434,1 N, 10,6 N acima de 423,5 N (só +2,5 %).
2. **Coast-down 80–70.** F_75 = 116,5 + 178,6 = 295,1 N. t = 990 × 2,778 / 295,1 = 9,32 s, contra 8,8 s — cerca de 6 % mais longo.

Resposta. f_0 = 116,5 N; F_100 = 434,1 N (+2,5 %); t_80–70 = 9,32 s, cerca de 6 % acima de 8,8 s.

Interpretação. A massa extra aparece pouco no regime a 100 km/h, porque o ar domina, e aparece mais no coast-down, onde a inércia e o rolamento crescem juntos. No ciclo com muitas acelerações, o efeito da massa é ainda maior do que neste coast-down, como já mostrou o exercício 18.10.

Erro comum a evitar. Aumentar f_2 também em 10 %, ou calcular o tempo com 990 kg e a força antiga de 285 N, sem atualizar o rolamento.

18.26. Uma hora mista, metade a 50 e metade a 100 km/h (Desafio)

Enunciado. O veículo roda 30 min a 50 km/h (P_el = 2,84 kW) e 30 min a 100 km/h (P_el = 13,0 kW). Qual é a energia da bateria, a distância e o consumo médio dessa hora?

Conceito. A energia é a soma das potências vezes os tempos. A distância é a soma das velocidades vezes os tempos. O consumo médio é a energia dividida pela distância, em kWh/100 km.

Fórmula. `E = Σ P t, d = Σ v t, c = E / d`

De onde vem. É um ciclo didático de dois patamares, para ver que o consumo médio não é a média aritmética de 2,84 e 13,0 kWh/100 km, porque as distâncias dos dois trechos são diferentes.

Resolução

1. **Energia e distância.** E = 2,84 × 0,50 + 13,0 × 0,50 = 7,92 kWh. d = 50 × 0,50 + 100 × 0,50 = 75 km.
2. **Consumo médio.** c = 7,92 / 75 × 100 = 10,56 kWh/100 km, mais perto do trecho de 100 km/h do que a média simples (7,92 kWh/100 km de média das potências, que não é o consumo).

Resposta. E = 7,92 kWh; d = 75 km; c = 10,56 kWh/100 km nesta hora mista.

Interpretação. Dos 75 km, dois terços foram a 100 km/h, então o consumo médio (10,56) fica mais perto de 13,0 do que de 5,68 kWh/100 km. Média de potência ou média de tempos não é média de consumo — o ciclo oficial faz exatamente esta conta, somando energia e distância.

Erro comum a evitar. Calcular a média aritmética (13,0 + 5,68) / 2 = 9,34 kWh/100 km, ou a média das potências 7,92 kW e tratá-la como kWh/100 km sem a distância de 75 km.

18.27. Rolamento 20 % maior a 50 km/h (Desafio)

Enunciado. Pneus mais duros ou um piso mais rugoso sobem o coeficiente de rolamento em 20 % (dado de exemplo). Qual é o novo f_0, a nova força a 50 km/h e o acréscimo de potência na roda, com f_2 inalterado?

Conceito. f_0 sobe 20 %. A 50 km/h o rolamento já era 57 % da força, então o acréscimo relativo da força total é menor do que 20 %, mas ainda visível. A potência extra é ΔF v.

Fórmula. `f_0' = 1,20 f_0, ΔP = (f_0' − f_0) v`

De onde vem. É a sensibilidade do termo de rolamento, o complemento urbano dos exercícios 18.9 e 18.20, que mexiam no ar.

Resolução

1. **Força e potência extra.** f_0' = 1,20 × 105,9 = 127,1 N. F = 127,1 + 79,4 = 206,5 N, contra 185,3 N. ΔP = 21,2 × 13,89 = 0,29 kW na roda.

Resposta. f_0 = 127,1 N; F_50 = 206,5 N; ΔP = 0,29 kW a 50 km/h.

Interpretação. A força total sobe 11 %, não 20 %, porque o ar não mudou. A 100 km/h o mesmo ΔF de 21,2 N seria só 5 % de 423,5 N, mas a potência extra iria a 0,59 kW — o pneu ruim aparece nas duas pontas, e no ciclo urbano pesa proporcionalmente mais.

Erro comum a evitar. Aplicar 20 % sobre os 185,3 N inteiros, inflando também a parcela do ar, ou esquecer de recalcular a potência com a nova força.

18.28. Resíduo do modelo a 75 km/h (Desafio)

Enunciado. O modelo do exercício 18.3, com f_1 = 0, prevê uma força a 75 km/h. Compare com os 285 N citados no exercício 18.2 e com os 284 N medidos no coast-down. Qual é o resíduo, em newtons e em porcentagem?

Conceito. Calcula-se F = f_0 + f_2 v² a 75 km/h e subtrai-se das duas referências. Um resíduo de 1 N em 285 N é compatível com o arredondamento e com a aproximação de força média no intervalo.

Fórmula. `F_mod = f_0 + f_2 v², resíduo = F_mod − F_ref`

De onde vem. É a conferência de consistência entre os três primeiros exercícios da disciplina, o tipo de checagem que se faz antes de cravar os coeficientes no dinamômetro.

Resolução

1. **Força do modelo.** v = 20,83 m/s. F_mod = 105,9 + 0,4116 × 20,83² = 105,9 + 178,6 = 284,5 N.
2. **Resíduos.** Contra 285 N: −0,5 N (−0,2 %). Contra 284 N medidos: +0,5 N (+0,2 %). Os três números fecham dentro de 1 N.

Resposta. F_mod = 284,5 N; resíduo de −0,5 N (−0,2 %) contra 285 N e de +0,5 N contra os 284 N medidos.

Interpretação. Meio newton é menos do que o erro de 6 N do cronômetro no exercício 18.12. Os coeficientes do exercício 18.3, a força média do 18.2 e os 285 N do enunciado original são o mesmo modelo, arredondado de formas ligeiramente diferentes. Pode cravar no dinamômetro.

Erro comum a evitar. Calcular F a 75 km/h com v em km/h e f_2 = 0,4116, obtendo milhares de newtons, ou tratar 1 N de diferença como se o modelo estivesse ‘errado’.

18.29. Potência recuperável numa frenagem a 50 km/h (Desafio)

Enunciado. O veículo desacelera a 2,00 m/s² a 50 km/h (dado de exemplo). A rodagem de 185,3 N já ajuda a frear. Qual força o eixo precisa aplicar, qual é a potência na roda, e quanto chega à bateria com rendimento de recuperação 0,90?

Conceito. A força de inércia é m a = 1 800 N no sentido de frear. A rodagem contribui com 185,3 N, então o eixo (motor em geração) aplica a diferença. A potência na roda é essa força vezes a velocidade, e a da bateria multiplica pelo rendimento de recuperação.

Fórmula. `F_eixo = m a − F_rod, P_bat = η F_eixo v`

De onde vem. É o balanço de forças no eixo em desaceleração, o inverso do exercício 18.10: agora a rodagem ajuda, não atrapalha.

Resolução

1. **Força no eixo.** m a = 900 × 2,00 = 1 800 N. F_eixo = 1 800 − 185,3 = 1 615 N (o motor em geração).
2. **Potências.** P_roda = 1 615 × 13,89 = 22,4 kW. P_bat = 0,90 × 22,4 = 20,2 kW entrando na bateria.

Resposta. F_eixo = 1 615 N; P_roda = 22,4 kW; P_bat = 20,2 kW recuperados, neste instante e neste rendimento.

Interpretação. Vinte quilowatts entrando na bateria, num instante, são o outro lado dos 9,75 kW do exercício 18.23. O dinamômetro precisa absorver (ou devolver) essa potência no rolo para o ciclo com recuperação ser fiel. Se o freio de fricção entrar, parte dos 22,4 kW vira calor e não chega à bateria.

Erro comum a evitar. Somar 1 800 N com 185,3 N, como na aceleração, e declarar que o motor aplica 1 985 N para frear.

18.30. Síntese: do coast-down ao consumo de regime (Desafio)

Enunciado. Reúna, para o up! ilustrativo no plano: os coeficientes do exercício 18.3, as forças a 50 e a 100 km/h, o rendimento 90,5 % e os consumos de bateria nesses dois regimes. O coast-down 80–70 km/h de 8,8 s é compatível com esses coeficientes?

Conceito. Os números já foram calculados. A conferência do coast-down é o resíduo do exercício 18.28: o modelo a 75 km/h dá 284,5 N, contra 284 N medidos e 285 N do enunciado original.

Fórmula. $F = f_0 + f_2\,v^2$, $c = (F\,v\,/\,\eta)\,/\,v$

De onde vem. É o fecho da disciplina: identificação, rendimento e consumo, com o ensaio de pista batendo no modelo.

Resolução

1. **Coeficientes e forças.** $f_0 = 105{,}9$ N, $f_2 = 0{,}4116$ N/(m/s)². $F_{50} = 185{,}3$ N, $F_{100} = 423{,}5$ N.
2. **Consumos e conferência.** Com $\eta = 90{,}5$ %, $c_{50} = 5{,}68$ kWh/100 km e $c_{100} = 13{,}0$ kWh/100 km. O coast-down de 8,8 s devolve 284 N, a 0,5 N do modelo — compatível.

Resposta. $f_0 = 105{,}9$ N e $f_2 = 0{,}4116$ N/(m/s)²; $F = 185{,}3$ N e 423,5 N; $c = 5{,}68$ e 13,0 kWh/100 km, com $\eta = 90{,}5$ %. O coast-down de 8,8 s é compatível (resíduo de 0,5 N).

Interpretação. Esta disciplina fecha assim: o coast-down identifica a força, o dinamômetro a reproduz, e o rendimento liga a roda à bateria. Com esses três tijolos se prevê o consumo de regime — e se enxerga por que o ciclo com paradas, rampas e vento, na disciplina seguinte, gasta mais do que os 13,0 kWh/100 km de uma estrada plana a 100 km/h.

Erro comum a evitar. Misturar os 14,7 kWh/100 km de outras disciplinas com os 13,0 kWh/100 km deste ensaio sem notar que os rendimentos de cadeia são diferentes (80 % versus 90,5 %).

Modelagem de Veículos Elétricos (12 h)

19.1. Energia da bateria em 100 km de ciclo (Básico)

Enunciado. Um ciclo ilustrativo pede 14,0 kWh na roda em 100 km. Com rendimento de transmissão 0,95 e de motor-inversor 0,90 (dados de exemplo, em série, sem recuperação neste exercício), qual energia sai da bateria e qual é o consumo em Wh/km?

Conceito. Os dois rendimentos se multiplicam. A energia da bateria é a da roda dividida por esse produto. O consumo em Wh/km é essa energia dividida pela distância, em km, vezes 1 000.

Fórmula. `E_bat = E_roda / (η_t η_m), c = E_bat / d`

De onde vem. É um balanço de energia em cadeia, com dois rendimentos em série no caminho da bateria até a roda, sem o termo de recuperação, que entra no exercício 19.2.

Resolução

1. **Rendimento conjunto e energia.** η = 0,95 × 0,90 = 0,855. E_bat = 14,0 / 0,855 = 16,37 kWh.
2. **Consumo.** c = 16,37 kWh / 100 km = 0,1637 kWh/km = 164 Wh/km.

Resposta. E_bat = 16,37 kWh; c = 164 Wh/km, em 100 km, com η conjunto de 85,5 %.

Interpretação. Cento e sessenta e quatro watthoras por quilômetro são 16,4 kWh/100 km, um pouco acima dos 13,0 kWh/100 km de regime a 100 km/h do dinamômetro: o ciclo tem acelerações, e este enunciado ainda não devolve energia nas paradas. Os 14,0 kWh na roda já incluem essas acelerações; os 2,37 kWh a mais são perda da cadeia.

Erro comum a evitar. Dividir 14,0 kWh por 0,90 ou por 0,95 só, esquecendo um dos rendimentos, ou somar 0,90 + 0,95 no lugar de multiplicá-los.

19.2. Energia recuperada em paradas a 60 km/h (Básico)

Enunciado. O up! de 900 kg freia até parar a partir de 60 km/h, com rendimento de recuperação 0,65 (dados de exemplo). Qual energia volta à bateria em uma parada? E em 200 paradas iguais?

Conceito. A energia cinética é (1/2) m v². A parcela que volta à bateria é essa energia vezes o rendimento de recuperação. As 200 paradas se somam, neste modelo em que todas partem de 60 km/h.

Fórmula. `E_c = (1/2) m v², E_rec = η_rec E_c`

De onde vem. É o balanço de energia cinética na frenagem, com um rendimento de recuperação menor do que o da tração, típico de um ciclo urbano ilustrativo.

Resolução

1. **Uma parada.** v = 60 / 3,6 = 16,67 m/s. E_c = 0,5 × 900 × 16,67² = 125 000 J = 0,0347 kWh. E_rec = 0,65 × 0,0347 = 0,0226 kWh.
2. **Duzentas paradas.** E_200 = 200 × 0,0226 = 4,51 kWh.

Resposta. E_rec = 0,0226 kWh por parada a 60 km/h; em 200 paradas, 4,51 kWh.

Interpretação. Quatro e meio quilowatts-hora são mais de um quarto dos 16,37 kWh do exercício 19.1. Num ciclo urbano com muitas paradas, a recuperação não é um detalhe: ela pode devolver uma fatia visível da energia que a aceleração pediu à bateria.

Erro comum a evitar. Esquecer o 1/2 em E_c, ou converter 125 000 J com 1 kWh = 1 000 J no lugar de 3,6 × 10⁶ J, inflando a energia por três ordens de grandeza.

19.3. SOC no fim de 100 km (Básico)

Enunciado. A bateria tem 32,0 kWh úteis e parte de 80 % de SOC. Depois de gastar os 16,37 kWh do exercício 19.1, qual é o SOC final?

Conceito. A energia inicial é SOC_i vezes a energia útil. A final é essa energia menos o gasto, e o SOC final é a razão pela energia útil.

Fórmula. `SOC_f = SOC_i − E_gasto / E_útil`

De onde vem. É um balanço de carga da bateria, o mesmo tipo de conta do exercício 15.14, agora em energia e não em ampères-hora.

Resolução

1. **Energia inicial, final e SOC.** E_i = 0,80 × 32,0 = 25,60 kWh. E_f = 25,60 − 16,37 = 9,23 kWh. SOC_f = 9,23 / 32,0 = 0,288 = 28,8 %.

Resposta. SOC_f = 28,8 %, a partir de 80 % em 32,0 kWh úteis, depois de gastar 16,37 kWh.

Interpretação. O veículo chega no fim dos 100 km com menos de 30 % de SOC. Se a recuperação do exercício 19.2, 4,51 kWh, viesse a creditá-lo, o gasto líquido cairia e o SOC final subiria — isso fica para um exercício seguinte. Sem ela, estes 100 km já comem mais da metade da carga útil de partida.

Erro comum a evitar. Calcular 80 % − 16,37 = 63,6 %, misturando porcentagem com quilowatts-hora, ou usar 16,37 / 25,60 e esquecer de referir o SOC aos 32,0 kWh úteis.

19.4. Ciclo com as 200 paradas creditadas (Básico)

Enunciado. No mesmo ciclo de 100 km do exercício 19.1, as 200 paradas do exercício 19.2 devolvem 4,51 kWh à bateria. Qual é o gasto líquido, o consumo em Wh/km e o SOC final, partindo de 80 % em 32,0 kWh úteis?

Conceito. O gasto líquido é a energia de tração menos a recuperada. O consumo e o SOC usam esse líquido, nas mesmas fórmulas dos exercícios 19.1 e 19.3.

Fórmula. `E_líq = E_trac − E_rec, SOC_f = SOC_i − E_líq / E_útil`

De onde vem. É o fechamento dos três primeiros exercícios: a recuperação entra como crédito no balanço da bateria.

Resolução

1. **Gasto líquido e consumo.** E_líq = 16,37 − 4,51 = 11,86 kWh. c = 11,86 kWh / 100 km = 119 Wh/km.
2. **SOC final.** E_f = 25,60 − 11,86 = 13,74 kWh. SOC_f = 13,74 / 32,0 = 42,9 %.

Resposta. E_líq = 11,86 kWh; c = 119 Wh/km; SOC_f = 42,9 %.

Interpretação. A recuperação devolve 4,51 kWh e sobe o SOC final de 28,8 % para 42,9 %, uma diferença de 14 pontos — neste ciclo muito parado. O consumo cai de 164 para 119 Wh/km. Sem modelar a recuperação, a autonomia urbana sai pessimista.

Erro comum a evitar. Somar 16,37 kWh com 4,51 kWh no lugar de subtrair, ou aplicar os 4,51 kWh sobre os 14,0 kWh da roda, misturando os dois lados da cadeia.

19.5. Recuperação a 80 km/h (Básico)

Enunciado. Repita o exercício 19.2 a partir de 80 km/h, com a mesma massa de 900 kg e η_rec = 0,65. Qual energia volta à bateria em uma parada?

Conceito. A energia cinética cresce com o quadrado da velocidade. De 60 para 80 km/h ela sobe com (80/60)² = 16/9, e a recuperada também, se o rendimento for o mesmo.

Fórmula. `E_rec = η_rec (1/2) m v²`

De onde vem. É o mesmo balanço do exercício 19.2, só com outra velocidade inicial.

Resolução

1. **Energia cinética e recuperada.** v = 22,22 m/s. E_c = 0,5 × 900 × 22,22² = 222 000 J = 0,0617 kWh. E_rec = 0,65 × 0,0617 = 0,0401 kWh, 1,78 vez a de 60 km/h.

Resposta. E_rec = 0,0401 kWh por parada a 80 km/h, 1,78 vez a de 60 km/h.

Interpretação. Uma parada a 80 km/h devolve quase o dobro de uma a 60 km/h. Por isso o valor de 0,0226 kWh do exercício 19.2 não se copia para um ciclo de estrada: lá se para menos, mas cada parada, quando acontece, vale mais.

Erro comum a evitar. Multiplicar 0,0226 kWh por 80/60 = 1,33 e declarar 0,0301 kWh, esquecendo o quadrado da velocidade.

19.6. Energia de tração para acelerar até 60 km/h (Básico)

Enunciado. Para entregar ao veículo a energia cinética de 0,0347 kWh do exercício 19.2 (0 a 60 km/h, 900 kg), quanto a bateria precisa fornecer, com o rendimento conjunto 0,855 do exercício 19.1, desprezando a rodagem neste trecho?

Conceito. A bateria fornece a energia cinética dividida pelo rendimento de tração. A rodagem, desprezada aqui, faria esse pedido um pouco maior.

Fórmula. `E_bat = E_c / η`

De onde vem. É o caminho inverso do exercício 19.2: a mesma energia cinética, agora paga na aceleração, com o η de tração, não o de recuperação.

Resolução

1. **Energia na bateria.** E_bat = 0,0347 / 0,855 = 0,0406 kWh por aceleração 0–60 km/h, neste modelo sem rodagem.

Resposta. E_bat = 0,0406 kWh por aceleração 0–60 km/h, desprezando a rodagem.

Interpretação. A bateria paga 0,0406 kWh para ganhar 0,0347 kWh de cinética e, na parada com η_rec = 0,65, recupera 0,0226 kWh. O saldo de um arranque-e-parada é 0,0180 kWh a fundo perdido — cerca de 44 % da energia que saiu da bateria nesta manobra.

Erro comum a evitar. Multiplicar 0,0347 kWh por 0,855, obtendo menos energia na bateria do que na roda, ou usar o rendimento de recuperação 0,65 nesta aceleração.

19.7. Autonomia da janela 80–20 % (Básico)

Enunciado. Com 32,0 kWh úteis, a janela de 80 % a 20 % de SOC vale 19,2 kWh. Qual autonomia essa janela dá com o consumo de 16,37 kWh/100 km do exercício 19.1, e com os 11,86 kWh/100 km do exercício 19.4, já com recuperação?

Conceito. A autonomia é a energia da janela dividida pelo consumo. Os dois consumos dão duas autonomias, a pessimista (sem recuperação) e a do ciclo com paradas creditadas.

Fórmula. `d = E_janela / c`

De onde vem. É a definição de autonomia a consumo constante, aplicada aos dois balanços já calculados.

Resolução

1. **Sem e com recuperação.** Sem: d = 19,2 / 0,1637 = 117 km. Com: d = 19,2 / 0,1186 = 162 km.

Resposta. 117 km sem recuperação e 162 km com as 200 paradas creditadas, nesta janela de 19,2 kWh.

Interpretação. Quarenta e cinco quilômetros de diferença, só por creditar a recuperação neste ciclo parado. A janela 80–20 % é a mesma da recarga do exercício 16.1: o que se repõe em 2 h 53 min no wallbox cobre, neste modelo, 117 a 162 km de uso.

Erro comum a evitar. Usar os 32,0 kWh inteiros no lugar da janela 80–20 %, ou dividir 19,2 kWh por 164 Wh/km sem converter as unidades.

19.8. Potência média no ciclo de 100 km (Básico)

Enunciado. O ciclo de 100 km do exercício 19.1 é cumprido a 40 km/h de velocidade média (dado de exemplo). Qual é a potência média retirada da bateria, sem creditar a recuperação?

Conceito. O tempo do percurso é a distância dividida pela velocidade média. A potência média é a energia da bateria dividida por esse tempo.

Fórmula. `t = d / v_méd, P_méd = E_bat / t`

De onde vem. É a definição de potência média, o mesmo tipo de conta da frota no exercício 16.3, agora num único veículo em ciclo.

Resolução

1. **Tempo e potência.** t = 100 / 40 = 2,50 h. P_méd = 16,37 / 2,50 = 6,55 kW.

Resposta. t = 2,50 h; P_méd = 6,55 kW na bateria, sem recuperação.

Interpretação. Seis e meio quilowatts médios são bem menos do que os 13,0 kW de regime a 100 km/h, porque a velocidade média é 40 km/h e há trechos em que o pedido cai. A potência de pico, nas acelerações, é outra conta — e pode ser várias vezes esta média.

Erro comum a evitar. Dividir 16,37 kWh por 40 km/h e declarar 0,41 kW, esquecendo que 100 km a 40 km/h levam 2,5 h, não 40 h.

19.9. Consumo na roda e na bateria (Básico)

Enunciado. Expresse os 14,0 kWh na roda e os 16,37 kWh na bateria do exercício 19.1 em Wh/km, nos mesmos 100 km. Qual é a diferença, em Wh/km, que a cadeia de tração come?

Conceito. O consumo é a energia dividida pela distância. A diferença entre os dois é a perda da cadeia, já embutida no rendimento 0,855.

Fórmula. `c = E / d, c_perda = c_bat − c_roda`

De onde vem. É a mesma energia do exercício 19.1, só escrita por quilômetro, para comparar com o 164 Wh/km já calculado.

Resolução

1. **Os dois consumos e a perda.** c_roda = 140 Wh/km. c_bat = 164 Wh/km. Perda da cadeia: 24 Wh/km, ou 2,37 kWh em 100 km.

Resposta. 140 Wh/km na roda, 164 Wh/km na bateria; a cadeia come 24 Wh/km.

Interpretação. Vinte e quatro watthoras por quilômetro são 15 % do pedido à bateria, o complemento de 85,5 %. Melhorar o rendimento de 0,855 para 0,90 reduziria essa perda a 16 Wh/km, com os mesmos 14,0 kWh na roda.

Erro comum a evitar. Declarar 14,0 Wh/km e 16,37 Wh/km, esquecendo o fator 1 000 entre quilowatts-hora e watthoras, ou inverter roda e bateria.

19.10. Quanto das 200 acelerações pesa no ciclo (Básico)

Enunciado. Se as 200 paradas do exercício 19.2 tiverem, cada uma, uma aceleração 0–60 km/h de 0,0406 kWh na bateria (exercício 19.6), qual energia de tração isso soma? Que fração é dos 16,37 kWh do exercício 19.1?

Conceito. A energia das acelerações é o número de arranques vezes o pedido de cada um. A fração compara esse total com a energia de tração do ciclo, que também inclui a rodagem.

Fórmula. `E_acel = N E_1, φ = E_acel / E_trac`

De onde vem. É a soma das manobras do exercício 19.6, confrontada com o balanço do exercício 19.1, para ver o peso do transiente no ciclo.

Resolução

1. **Total e fração.** E_acel = 200 × 0,0406 = 8,12 kWh. φ = 8,12 / 16,37 = 0,496 = 49,6 %, cerca de metade da energia de tração, neste modelo que ainda despreza a rodagem em cada arranque.

Resposta. E_acel = 8,12 kWh, cerca de 49,6 % dos 16,37 kWh de tração.

Interpretação. Metade da energia de tração deste ciclo vai só para ganhar cinética, o que combina com as 200 paradas em 100 km — uma a cada 500 m, um urbano bem parado. A outra metade cobre a rodagem. Por isso creditar os 4,51 kWh recuperados muda tanto o consumo.

Erro comum a evitar. Multiplicar 200 × 0,0226 kWh (a recuperação) e comparar com 16,37 kWh, trocando o pedido de tração pelo crédito de frenagem.

19.11. Decompor o gasto líquido do ciclo (Intermediário)

Enunciado. Com os 8,12 kWh das 200 acelerações (exercício 19.10), os 4,51 kWh recuperados (exercício 19.2) e os 16,37 kWh de tração (exercício 19.1), separe o gasto líquido de 11,86 kWh (exercício 19.4) em parcela de rodagem e parcela líquida das manobras.

Conceito. A energia de rodagem é o que sobra da tração depois de tirar as acelerações. A parcela líquida das manobras é o pedido das acelerações menos a recuperação. As duas somam o gasto líquido.

Fórmula. `E_rod = E_trac − E_acel, E_man = E_acel − E_rec, E_líq = E_rod + E_man`

De onde vem. É um balanço em duas parcelas, para conferir que os exercícios 19.1, 19.2, 19.4 e 19.10 são o mesmo ciclo, só decomposto.

Resolução

1. **As duas parcelas.** E_rod = 16,37 − 8,12 = 8,25 kWh. E_man = 8,12 − 4,51 = 3,61 kWh. Soma: 8,25 + 3,61 = 11,86 kWh, igual ao exercício 19.4.

Resposta. E_rod = 8,25 kWh e E_man = 3,61 kWh, que somam os 11,86 kWh líquidos.

Interpretação. A rodagem ainda é a maior fatia, mas as manobras líquidas levam 30 % do gasto neste urbano parado. Melhorar η_rec atua só sobre os 3,61 kWh; reduzir C_d ou o rolamento atua sobre os 8,25 kWh — os dois caminhos importam, e o peso de cada um muda com o ciclo.

Erro comum a evitar. Somar 8,12 kWh com 4,51 kWh e chamar isso de gasto das manobras, ou esquecer de conferir que a soma fecha em 11,86 kWh.

19.12. Massa 10 % maior nas paradas (Intermediário)

Enunciado. Com 990 kg no lugar de 900 kg, a energia cinética a 60 km/h e a recuperada com η_rec = 0,65 também sobem 10 %. Quais são os novos valores por parada e em 200 paradas?

Conceito. E_c é proporcional à massa. Com o mesmo rendimento e a mesma velocidade, E_rec e o total de 200 paradas sobem 10 %.

Fórmula. `E_rec' = 1,10 E_rec`

De onde vem. É o exercício 19.2 com a massa do exercício 18.25, para ver o efeito no ciclo e não só no coast-down.

Resolução

1. **Novos valores.** E_c' = 1,10 × 0,0347 = 0,0382 kWh. E_rec' = 0,65 × 0,0382 = 0,0248 kWh por parada. Em 200: 4,96 kWh, 0,45 kWh a mais do que 4,51 kWh.

Resposta. E_rec = 0,0248 kWh por parada; 4,96 kWh em 200 paradas, 0,45 kWh a mais.

Interpretação. A massa maior devolve 0,45 kWh a mais, mas também pede 10 % a mais em cada aceleração (cerca de 0,81 kWh nos 8,12 kWh). O saldo das manobras piora: o rendimento de recuperação é menor do que o de tração, então massa extra custa mais do que devolve.

Erro comum a evitar. Deixar E_rec em 0,0226 kWh, como se a recuperação não dependesse da massa, ou subir só o número de paradas.

19.13. Rendimento de recuperação 0,80 (Intermediário)

Enunciado. Se o rendimento de recuperação subir de 0,65 para 0,80 (dado de exemplo), quanto volta à bateria por parada a 60 km/h, e em 200 paradas? Qual passa a ser o gasto líquido do ciclo de 16,37 kWh?

Conceito. E_rec é proporcional a η_rec, com a mesma energia cinética. O gasto líquido é a tração menos esse novo crédito.

Fórmula. `E_rec = η_rec E_c, E_líq = E_trac − E_rec^N`

De onde vem. É o exercício 19.2 e o 19.4 com um recuperador mais eficiente, o tipo de ganho que um ajuste de freio regenerativo pode trazer.

Resolução

1. **Novo crédito e gasto líquido.** E_rec = 0,80 × 0,0347 = 0,0278 kWh por parada. Em 200: 5,56 kWh. E_líq = 16,37 − 5,56 = 10,81 kWh, 1,05 kWh abaixo dos 11,86 kWh com η = 0,65.

Resposta. E_rec = 0,0278 kWh por parada e 5,56 kWh em 200; E_líq = 10,81 kWh no ciclo.

Interpretação. Subir o rendimento de 0,65 para 0,80 devolve mais 1,05 kWh em 100 km, ou 10,5 Wh/km. Não é tão grande quanto mudar o número de paradas, mas é um ganho ‘de graça’ no mesmo ciclo, limitado pelo freio de fricção e pelo teto de potência do motor.

Erro comum a evitar. Aplicar 0,80 sobre os 4,51 kWh já com η = 0,65 (3,61 kWh), no lugar de voltar à energia cinética, ou trocar os 0,80 com o rendimento de tração 0,855.

19.14. Acessórios de 1,0 kW no ciclo de 2,50 h (Intermediário)

Enunciado. Além da tração de 16,37 kWh, o climatizador e os acessórios pedem 1,00 kW constantes durante as 2,50 h do exercício 19.8 (dado de exemplo). Qual energia extra isso gasta? Qual passa a ser o gasto total, sem recuperação, e o SOC final a partir de 80 % em 32,0 kWh úteis?

Conceito. A energia dos acessórios é a potência vezes o tempo, independente da distância. Soma-se à tração. O SOC usa o total, como no exercício 19.3.

Fórmula. `E_aux = P_aux t, E_tot = E_trac + E_aux`

De onde vem. É um consumo de tempo, não de quilômetro, típico do clima e da 12 V, que o modelo de tração sozinho não captura.

Resolução

1. **Extra e total.** E_aux = 1,00 × 2,50 = 2,50 kWh. E_tot = 16,37 + 2,50 = 18,87 kWh.
2. **SOC final.** E_f = 25,60 − 18,87 = 6,73 kWh. SOC_f = 6,73 / 32,0 = 21,0 %.

Resposta. E_aux = 2,50 kWh; E_tot = 18,87 kWh; SOC_f = 21,0 %, sem recuperação.

Interpretação. Dois e meio quilowatts-hora de clima em 2,5 h puxam o SOC de 28,8 % para 21,0 %. Em cidade lenta, o acessório pesa mais por quilômetro do que em estrada, porque o tempo cresce e a tração não. No verão, o 164 Wh/km de tração não conta a história inteira.

Erro comum a evitar. Somar 1,00 kW aos 16,37 kWh, misturando potência com energia, ou aplicar os 2,50 kWh também sobre a roda.

19.15. Trecho de 10 km em aclive de 5 % (Intermediário)

Enunciado. No ciclo de 100 km entra um trecho de 10,0 km com aclive de 5 %. A força de declividade é 441,5 N (exercício 18.8). Qual energia extra isso pede na roda e na bateria, com η = 0,855, em relação ao mesmo trecho no plano?

Conceito. O trabalho da declividade é F_i vezes a distância horizontal, em metros. A bateria paga esse trabalho dividido pelo rendimento de tração. A rodagem do trecho já estava no ciclo e não se soma outra vez.

Fórmula. `E_roda = F_i d, E_bat = E_roda / η`

De onde vem. É o termo de rampa da dinâmica veicular, integrado num trecho, e levado à bateria com o η do exercício 19.1.

Resolução

1. **Trabalho e energia na bateria.** E_roda = 441,5 × 10 000 = 4,415 MJ = 1,23 kWh. E_bat = 1,23 / 0,855 = 1,43 kWh extras em 10 km de rampa.

Resposta. E_roda = 1,23 kWh; E_bat = 1,43 kWh extras nos 10 km de rampa de 5 %.

Interpretação. Um quilowatt-hora e meio em só 10 km é 14,3 kWh/100 km só de rampa, quase o consumo inteiro do ciclo no plano. Na descida, parte pode voltar com η_rec; se não voltar, estes 1,43 kWh estão a fundo perdido. O ciclo ‘plano’ do exercício 19.1 não representa uma cidade com morro.

Erro comum a evitar. Usar 441,5 N × 10 km = 4 415 kWh, esquecendo de passar a distância para metros e de dividir por 3,6 × 10^6 J/kWh, ou somar a rodagem outra vez.

19.16. Ciclo com 100 paradas, não 200 (Intermediário)

Enunciado. O mesmo percurso de 100 km, com a mesma energia de tração 16,37 kWh, tem agora 100 paradas a 60 km/h no lugar de 200. Quanto se recupera com η_rec = 0,65? Qual é o gasto líquido e o consumo?

Conceito. A recuperação cai à metade, porque o número de paradas cai à metade e cada uma vale 0,0226 kWh. A tração, neste enunciado, permanece 16,37 kWh — uma hipótese: o pedido das acelerações também cairia, mas isso fica explícito no passo da interpretação.

Fórmula. `E_rec = N × 0,0226, E_líq = E_trac − E_rec`

De onde vem. É o exercício 19.4 com metade das paradas, para ver a sensibilidade do consumo ao ‘stop-and-go’.

Resolução

1. **Crédito e líquido, tração fixa.** E_rec = 100 × 0,0226 = 2,26 kWh. E_líq = 16,37 − 2,26 = 14,11 kWh, ou 141 Wh/km.

Resposta. E_rec = 2,26 kWh; E_líq = 14,11 kWh, ou 141 Wh/km, com a tração mantida em 16,37 kWh.

Interpretação. Com metade das paradas o crédito cai, e o líquido sobe de 119 para 141 Wh/km, se a tração não mudar. Na prática a tração também cairia (menos 100 × 0,0406 = 4,06 kWh de acelerações), e o líquido poderia ficar perto de 16,37 − 4,06 + 8,25? Não: tração nova = 16,37 − 4,06 = 12,31 kWh, menos 2,26 kWh = 10,05 kWh (101 Wh/km). O enunciado fixou a tração para isolar o efeito do crédito; o ciclo ‘de verdade’ precisa atualizar os dois lados.

Erro comum a evitar. Dividir também os 16,37 kWh pela metade, como se a rodagem caísse com o número de paradas, ou usar 200 × 0,0226 outra vez.

19.17. Motor-inversor a 92 % no lugar de 90 % (Intermediário)

Enunciado. Se o rendimento do motor-inversor subir de 0,90 para 0,92, com a transmissão ainda em 0,95 e os mesmos 14,0 kWh na roda, qual energia sai da bateria? Quanto se economiza em relação aos 16,37 kWh do exercício 19.1?

Conceito. O rendimento conjunto é de novo o produto. A energia da bateria é a da roda dividida por esse produto. A economia é a diferença para os 16,37 kWh.

Fórmula. `E_bat = E_roda / (η_t η_m)`

De onde vem. É o exercício 19.1 com um rendimento de tração um pouco melhor, o tipo de ganho que um ponto de operação mais eficiente pode trazer no mesmo ciclo.

Resolução

1. **Novo rendimento e energia.** η = 0,95 × 0,92 = 0,874. E_bat = 14,0 / 0,874 = 16,02 kWh.
2. **Economia.** 16,37 − 16,02 = 0,35 kWh em 100 km, ou 3,5 Wh/km.

Resposta. E_bat = 16,02 kWh; economia de 0,35 kWh em 100 km, ou 3,5 Wh/km.

Interpretação. Dois pontos percentuais no motor-inversor rendem 0,35 kWh, bem menos do que os 4,51 kWh da recuperação neste ciclo parado — mas o ganho vale em qualquer ciclo, inclusive na estrada sem paradas. Os dois caminhos se somam, não se substituem.

Erro comum a evitar. Trocar só o 0,90 por 0,92 e esquecer a transmissão (14,0 / 0,92 = 15,22 kWh), ou subtrair 2 pontos de 16,37 kWh diretamente.

19.18. Potência média já com a recuperação (Intermediário)

Enunciado. Com o gasto líquido de 11,86 kWh do exercício 19.4 e as mesmas 2,50 h a 40 km/h do exercício 19.8, qual é a potência média líquida retirada da bateria?

Conceito. A potência média líquida é a energia líquida dividida pelo tempo. Ela já desconta o que a recuperação devolveu ao longo do ciclo.

Fórmula. `P_méd = E_líq / t`

De onde vem. É o exercício 19.8 refeito com o balanço líquido do exercício 19.4.

Resolução

1. **Potência média líquida.** P_méd = 11,86 / 2,50 = 4,74 kW, 1,81 kW abaixo dos 6,55 kW sem recuperação.

Resposta. P_méd = 4,74 kW líquidos, 1,81 kW abaixo dos 6,55 kW sem recuperação.

Interpretação. Quatro vírgula setenta e quatro quilowatts médios são um pedido manso para um pacote de 32 kWh. A potência de pico nas acelerações continua bem maior; a média líquida só diz o que a bateria efetivamente perdeu no fim das 2,50 h.

Erro comum a evitar. Dividir 11,86 kWh por 40 km/h, ou reusar os 6,55 kW e só ‘descontar 0,65’, sem refazer a conta com a energia líquida.

19.19. Acessórios e recuperação no mesmo ciclo (Intermediário)

Enunciado. Some os 2,50 kWh de acessórios do exercício 19.14 ao gasto líquido de 11,86 kWh do exercício 19.4. Qual é o gasto total, o consumo em Wh/km e o SOC final, partindo de 80 % em 32,0 kWh úteis?

Conceito. Os acessórios não passam pela recuperação de frenagem. O gasto total é o líquido de tração mais a energia dos acessórios. O consumo e o SOC usam esse total.

Fórmula. `E_tot = E_líq + E_aux, SOC_f = SOC_i − E_tot / E_útil`

De onde vem. Combina os exercícios 19.4 e 19.14, o modelo mais completo deste ciclo: tração, recuperação e clima.

Resolução

1. **Total, consumo e SOC.** E_tot = 11,86 + 2,50 = 14,36 kWh. c = 144 Wh/km. E_f = 25,60 − 14,36 = 11,24 kWh. SOC_f = 11,24 / 32,0 = 35,1 %.

Resposta. E_tot = 14,36 kWh; c = 144 Wh/km; SOC_f = 35,1 %.

Interpretação. Com recuperação e clima, o SOC final fica entre os 42,9 % do exercício 19.4 e os 21,0 % do 19.14 sem recuperação. Os acessórios comem 2,50 kWh; a recuperação devolve 4,51 kWh. Neste ciclo, o recuperador ainda ‘paga’ o clima e sobra crédito.

Erro comum a evitar. Descontar os 2,50 kWh dos 4,51 kWh recuperados e esquecer a tração, ou somar os acessórios aos 16,37 kWh e não creditar a recuperação.

19.20. Autonomia da janela com clima e recuperação (Intermediário)

Enunciado. Com o consumo de 14,36 kWh/100 km do exercício 19.19 (tração líquida + acessórios), qual autonomia dá a janela de 19,2 kWh (80–20 % de 32,0 kWh úteis)? Compare com os 162 km do exercício 19.7, só com recuperação.

Conceito. A autonomia é de novo a energia da janela dividida pelo consumo. Os acessórios reduzem a autonomia em relação ao caso só com recuperação.

Fórmula. `d = E_janela / c`

De onde vem. É o exercício 19.7 com o consumo mais completo do exercício 19.19.

Resolução

1. **Autonomia e comparação.** d = 19,2 / 0,1436 = 134 km, 28 km abaixo dos 162 km sem os acessórios.

Resposta. d = 134 km, 28 km abaixo dos 162 km do exercício 19.7, só com recuperação.

Interpretação. O climatizador de 1 kW, nestas 2,50 h por 100 km, come 28 km da janela 80–20 %. Em um dia quente e parado no trânsito, a autonomia ‘de ciclo’ do exercício 19.7 fica otimista se o clima não entrar na conta.

Erro comum a evitar. Usar 11,86 kWh/100 km outra vez, esquecendo os acessórios, ou dividir 32,0 kWh por 0,1436 e declarar 223 km, usando a bateria inteira no lugar da janela.

19.21. Dois rendimentos iguais a 0,95 (Desafio)

Enunciado. Se transmissão e motor-inversor tiverem ambos rendimento 0,95, com os mesmos 14,0 kWh na roda, qual energia sai da bateria? Quanto se economiza em relação aos 16,37 kWh do exercício 19.1?

Conceito. O produto é $0{,}95^2$. A energia da bateria e a economia seguem o mesmo método do exercício 19.17.

Fórmula. `E_bat = E_roda / (η_t η_m)`

De onde vem. É um teto didático de cadeia, com os dois elos no mesmo patamar alto.

Resolução

1. **Energia e economia.** $\eta = 0{,}95 \times 0{,}95 = 0{,}9025$. E_bat = 14,0 / 0,9025 = 15,51 kWh. Economia: 16,37 − 15,51 = 0,86 kWh, ou 8,6 Wh/km.

Resposta. E_bat = 15,51 kWh; economia de 0,86 kWh em 100 km, ou 8,6 Wh/km.

Interpretação. Mesmo com a cadeia a 90,25 %, ainda se perdem 1,51 kWh nos 100 km. A recuperação do exercício 19.2, 4,51 kWh, continua sendo a alavanca maior neste urbano. Melhorar a cadeia rende de forma permanente; melhorar a recuperação rende quando se para.

Erro comum a evitar. Usar $\eta = 0{,}95$ uma vez só (14,0 / 0,95 = 14,74 kWh), esquecendo que são dois elos em série.

19.22. Meio ciclo, 50 km nas mesmas condições (Desafio)

Enunciado. O veículo faz só 50 km no mesmo ciclo (metade da distância, metade das paradas, metade do tempo). Quais são a energia de tração, a recuperada e o gasto líquido, a partir dos 16,37 kWh, 4,51 kWh e 11,86 kWh dos 100 km?

Conceito. Se a intensidade do ciclo se mantém, as três energias caem à metade, porque distância, número de paradas e rodagem são proporcionais.

Fórmula. `E_50 = (50 / 100) E_100`

De onde vem. É a homogeneidade do modelo de ciclo a intensidade constante: energia proporcional à distância.

Resolução

1. **As três energias.** Tração: 8,19 kWh. Recuperada: 2,26 kWh. Líquido: 5,93 kWh, ou os mesmos 119 Wh/km do exercício 19.4.

Resposta. Tração 8,19 kWh, recuperada 2,26 kWh e líquido 5,93 kWh, ainda 119 Wh/km.

Interpretação. O consumo por quilômetro não muda quando se corta o ciclo no meio, neste modelo. O que muda é o SOC: partindo de 80 %, o final seria 25,60 − 5,93 = 19,67 kWh, ou 61,5 %, bem mais folgado do que os 42,9 % dos 100 km.

Erro comum a evitar. Manter os 16,37 kWh de tração nos 50 km, ou cair só a recuperação e deixar a tração inteira.

19.23. Ida e volta da rampa de 10 km (Desafio)

Enunciado. Depois de subir os 10 km de 5 % do exercício 19.15 (1,23 kWh na roda, 1,43 kWh na bateria), o veículo desce o mesmo trecho. Com $\eta_{rec} = 0{,}65$ sobre os 1,23 kWh na roda, quanto volta à bateria? Qual é o saldo líquido da ida e volta, só da declividade?

Conceito. Na descida, o trabalho da declividade está disponível na roda e volta à bateria pelo rendimento de recuperação. O saldo é o que se pagou na subida menos o que se recuperou na descida.

Fórmula. $E_{volta} = \eta_{rec} E_{roda}$, $E_{saldo} = E_{subida} - E_{volta}$

De onde vem. É o ciclo de ida e volta de uma rampa, o análogo do arranque-e-parada do exercício 19.6, agora com energia potencial.

Resolução

1. **Descida e saldo.** $E_{volta} = 0{,}65 \times 1{,}23 = 0{,}80$ kWh. $E_{saldo} = 1{,}43 - 0{,}80 = 0{,}63$ kWh a fundo perdido na ida e volta.

Resposta. $E_{volta} = 0{,}80$ kWh; saldo = 0,63 kWh perdidos na ida e volta da rampa, só da declividade.

Interpretação. Subir e descer o mesmo morro não é de graça: 0,63 kWh se perdem porque se paga com $\eta = 0{,}855$ e se recupera com $\eta = 0{,}65$. Se o freio de fricção entrar na descida, o crédito cai e o saldo piora. Cidade com morro gasta mais do que o ciclo plano do exercício 19.1.

Erro comum a evitar. Recuperar também com 0,855, ou subtrair 1,23 kWh de 1,43 kWh e declarar 0,20 kWh, esquecendo que a descida não devolve a energia inteira da roda.

19.24. Ciclo urbano versus regime a 100 km/h (Desafio)

Enunciado. Compare o consumo líquido urbano de 11,86 kWh/100 km do exercício 19.4 com os 13,0 kWh/100 km de regime a 100 km/h do exercício 18.7. Qual é menor, e por quê o urbano pode ganhar mesmo com tantas paradas?

Conceito. A comparação é direta entre os dois consumos de bateria. O urbano tem recuperação e roda mais devagar, então a parcela aerodinâmica é bem menor; o regime a 100 km/h não para, mas enfrenta muito mais ar.

Fórmula. `Δc = c_estrada − c_urbano`

De onde vem. Cruza a modelagem do ciclo com o ensaio de dinamômetro da disciplina anterior.

Resolução

1. **Diferença.** Δc = 13,0 − 11,86 = 1,14 kWh/100 km. O urbano líquido, neste modelo, gasta 8,8 % menos do que a estrada constante a 100 km/h.

Resposta. O urbano líquido (11,86 kWh/100 km) gasta 1,14 kWh/100 km a menos do que os 13,0 kWh/100 km a 100 km/h.

Interpretação. Sem a recuperação, o urbano de 16,37 kWh/100 km perderia para a estrada. Com ela, neste ciclo a 40 km/h médios, o ar baixo e os 4,51 kWh devolvidos viram o jogo. Se entrar o clima do exercício 19.19 (14,36 kWh/100 km), a estrada volta a ser um pouco melhor. O vencedor depende do que se inclui no modelo.

Erro comum a evitar. Comparar os 16,37 kWh sem recuperação com 13,0 e concluir que o urbano sempre perde, ou comparar 11,86 kWh com 11,76 kWh da roda a 100 km/h, misturando bateria e roda.

19.25. Teto teórico da recuperação, η_rec = 1 (Desafio)

Enunciado. Se toda a energia cinética das 200 paradas a 60 km/h voltasse à bateria (η_rec = 1, teto teórico), quanto se recuperaria? Qual seria o gasto líquido, com a tração ainda em 16,37 kWh?

Conceito. Com η_rec = 1, o crédito é a energia cinética inteira, 0,0347 kWh por parada. O líquido é a tração menos esse teto. O caso é um limite, não um projeto real.

Fórmula. `E_rec^máx = N E_c, E_líq = E_trac − E_rec^máx`

De onde vem. É o exercício 19.2 no limite ideal, para ver quanto ainda se deixa na mesa com η_rec = 0,65.

Resolução

1. **Teto e líquido.** E_rec^máx = 200 × 0,0347 = 6,94 kWh. E_líq = 16,37 − 6,94 = 9,43 kWh, 2,43 kWh abaixo dos 11,86 kWh com η_rec = 0,65.

Resposta. E_rec^máx = 6,94 kWh; E_líq = 9,43 kWh no teto teórico, 2,43 kWh abaixo dos 11,86 kWh com η_rec = 0,65.

Interpretação. Os 2,43 kWh que faltam para o teto são o preço do rendimento 0,65 e, na prática, também do freio de fricção e do limite de potência. Nem um recuperador perfeito zera o gasto: sobram os 8,25 kWh de rodagem e a perda da cadeia nas acelerações, porque se paga 0,0406 kWh para ganhar 0,0347 kWh de cinética.

Erro comum a evitar. Tomar os 8,12 kWh de tração das acelerações como teto de recuperação, ou declarar líquido zero, como se toda a tração do ciclo fosse cinética.

19.26. Tempo até 0 % à potência média do ciclo (Desafio)

Enunciado. Partindo de 80 % em 32,0 kWh úteis (25,60 kWh), quanto tempo e quantos quilômetros duram até zerar o SOC, à potência média de 6,55 kW sem recuperação e à de 4,74 kW com recuperação, a 40 km/h médios?

Conceito. O tempo até zerar é a energia inicial dividida pela potência média. A distância é a velocidade média vezes esse tempo. O modelo assume potência constante, uma extrapolação da média do ciclo.

Fórmula. `t = E_i / P_méd, d = v_méd t`

De onde vem. É a autonomia escrita em tempo e em distância, com as duas potências médias dos exercícios 19.8 e 19.18.

Resolução

1. **Sem recuperação.** t = 25,60 / 6,55 = 3,91 h. d = 40 × 3,91 = 156 km.
2. **Com recuperação.** t = 25,60 / 4,74 = 5,40 h. d = 40 × 5,40 = 216 km.

Resposta. Sem recuperação: 3,91 h e 156 km. Com recuperação: 5,40 h e 216 km, até zerar o SOC.

Interpretação. Duzentos e dezesseis quilômetros até 0 % partindo de 80 % batem com 25,60 / 0,1186 = 216 km. Ir até zero não é uso recomendado — a janela 80–20 % do exercício 19.7 é o número de projeto. Esta conta só mostra o teto do pacote neste ciclo.

Erro comum a evitar. Dividir 32,0 kWh, e não os 25,60 kWh de partida, pela potência média, ou esquecer de multiplicar o tempo por 40 km/h.

19.27. Autonomia depois de 20 % de fade (Desafio)

Enunciado. Depois de um fade de 20 % na energia útil, o pacote de 32,0 kWh fica com 25,6 kWh úteis. Qual é a nova janela 80–20 %, e qual autonomia ela dá com os 11,86 kWh/100 km do exercício 19.4?

Conceito. A janela 80–20 % é 60 % da energia útil nova. A autonomia é essa janela dividida pelo consumo, que neste modelo não muda com o fade.

Fórmula. `E_janela = 0,60 E_útil', d = E_janela / c`

De onde vem. Combina o fade já visto nas baterias com o consumo líquido do ciclo, para ver o que acontece com a autonomia ao longo da vida do pacote.

Resolução

1. **Janela e autonomia.** E_janela = 0,60 × 25,6 = 15,36 kWh. d = 15,36 / 0,1186 = 129 km, contra 162 km com o pacote novo.

Resposta. Janela = 15,36 kWh; autonomia = 129 km, 33 km abaixo dos 162 km do pacote novo.

Interpretação. Vinte por cento a menos de energia útil cortam 20 % da autonomia neste modelo (162 × 0,80 = 130 km, o 1 km de diferença é arredondamento). O consumo por quilômetro não muda; o que encolhe é o tanque. É o mesmo fade do exercício 15.24, agora lido em quilômetros de ciclo.

Erro comum a evitar. Aplicar os 20 % sobre os 162 km depois de ter reduzido também o consumo, ou usar os 25,6 kWh inteiros no lugar da janela 80–20 %.

19.28. Duzentas paradas a 80 km/h, atualizando a tração (Desafio)

Enunciado. As 200 paradas passam a ser a 80 km/h. A rodagem do ciclo permanece 8,25 kWh. A energia cinética e o pedido de tração de cada arranque sobem com $(80/60)^2$. Com $\eta_{rec} = 0{,}65$ e $\eta_{trac} = 0{,}855$, qual é o novo gasto líquido em 100 km?

Conceito. A cinética, a tração de cada arranque e a recuperação sobem com o quadrado da velocidade. A rodagem, neste enunciado, fica igual. O líquido é rodagem mais tração das acelerações menos a recuperação.

Fórmula. $k = (80 / 60)^2$, $E_{líq} = E_{rod} + k\,E_{acel} - k\,E_{rec}$

De onde vem. É o ciclo do exercício 19.11 com paradas mais rápidas, atualizando os dois lados da manobra, o contrário da hipótese do exercício 19.16, que fixava a tração.

Resolução

1. **Fator e novas parcelas.** $k = (80/60)^2 = 1{,}778$. $E_{acel} = 1{,}778 \times 8{,}12 = 14{,}44$ kWh. $E_{rec} = 1{,}778 \times 4{,}51 = 8{,}02$ kWh.
2. **Líquido.** $E_{líq} = 8{,}25 + 14{,}44 - 8{,}02 = 14{,}67$ kWh, ou 147 Wh/km, acima dos 119 Wh/km a 60 km/h.

Resposta. $E_{acel} = 14{,}44$ kWh, $E_{rec} = 8{,}02$ kWh, $E_{líq} = 14{,}67$ kWh, ou 147 Wh/km.

Interpretação. Parar a 80 km/h no lugar de 60 km/h encarece o ciclo em 2,81 kWh, mesmo com mais recuperação, porque se paga a cinética com $\eta = 0{,}855$ e se recupera com 0,65. O urbano ‘a 80 km/h entre semáforos’ é bem mais gastador do que o de 60 km/h do enunciado original.

Erro comum a evitar. Atualizar só a recuperação e deixar os 8,12 kWh de aceleração, ou usar o fator 80/60 = 1,33 no lugar do quadrado.

19.29. Quatro consumos do mesmo up! ilustrativo (Desafio)

Enunciado. Reúna, em kWh/100 km na bateria: o regime a 100 km/h do exercício 18.7, o ciclo urbano sem recuperação do exercício 19.1, o ciclo com recuperação do 19.4 e o ciclo com recuperação e acessórios do 19.19. Qual é a ordem, da mais econômica para a mais gastadora, neste conjunto de hipóteses?

Conceito. Os quatro números já foram calculados. A ordem se lê diretamente, e cada um vale no regime que o definiu — não é um ranking universal.

Fórmula. `c = E / d`

De onde vem. É um quadro-resumo da modelagem, para não misturar regime de estrada, ciclo urbano e clima.

Resolução

1. **Os quatro consumos.** Com recuperação, sem clima: 11,86. Regime a 100 km/h: 13,0. Com recuperação e clima: 14,36. Urbano sem recuperação: 16,37.
2. **Ordem.** Do menor para o maior: 11,86; 13,0; 14,36; 16,37 kWh/100 km.

Resposta. Ordem crescente: 11,86 (urbano com recuperação); 13,0 (regime a 100 km/h); 14,36 (com recuperação e clima); 16,37 (urbano sem recuperação), todos em kWh/100 km na bateria.

Interpretação. Não existe um único ‘consumo do up!’. O número certo é o do regime que se quer representar. O 14,7 kWh/100 km usado em outras disciplinas é uma hipótese conservadora de uso misto, e cai entre o ciclo com clima e o urbano sem recuperação — coerente, não contraditório.

Erro comum a evitar. Colocar o regime a 100 km/h como o mais econômico, esquecendo a recuperação urbana, ou misturar 11,76 kWh da roda com os números da bateria.

19.30. Síntese: do ciclo ao SOC (Desafio)

Enunciado. Reúna o ciclo de 100 km: 14,0 kWh na roda, 16,37 kWh na bateria sem recuperação, 4,51 kWh recuperados em 200 paradas a 60 km/h, gasto líquido 11,86 kWh e SOC final 42,9 % a partir de 80 % em 32,0 kWh úteis. Se os acessórios de 2,50 kWh entrarem, o que muda no gasto e no SOC?

Conceito. Os números de tração e recuperação já fecham entre si, como no exercício 19.11. Os acessórios se somam ao líquido e baixam o SOC, como no exercício 19.19.

Fórmula. `E_líq = E_trac − E_rec, E_tot = E_líq + E_aux`

De onde vem. É o fecho da disciplina: cadeia, paradas, crédito, clima e estado de carga no mesmo ciclo ilustrativo.

Resolução

1. **Tração e recuperação.** E_trac = 16,37 kWh, E_rec = 4,51 kWh, E_líq = 11,86 kWh (119 Wh/km), SOC_f = 42,9 % sem acessórios.
2. **Com acessórios.** E_tot = 14,36 kWh (144 Wh/km), SOC_f = 35,1 %, como no exercício 19.19.

Resposta. Sem acessórios: 11,86 kWh líquidos e SOC 42,9 %. Com 2,50 kWh de acessórios: 14,36 kWh e SOC 35,1 %.

Interpretação. Esta disciplina fecha assim: a cadeia transforma os 14,0 kWh da roda em 16,37 kWh na bateria; as paradas devolvem 4,51 kWh; o clima, se estiver ligado, come 2,50 kWh. O SOC no fim dos 100 km — 42,9 % ou 35,1 % — é o número que liga a modelagem à recarga e à autonomia de projeto.

Erro comum a evitar. Somar 16,37 kWh com 4,51 kWh no lugar de subtrair, ou aplicar os acessórios sobre os 14,0 kWh da roda.

Eletrônica de Potência (20 h)

20.1. Razão cíclica de um buck e de um boost ideais (Básico)

Enunciado. Em condução contínua e sem perdas, calcule a razão cíclica D de um conversor abaixador (buck) de 400 V para 200 V e de um elevador (boost) de 200 V para 400 V (dados de exemplo).

Conceito. No buck ideal, a tensão de saída é D vezes a de entrada, então D = V_s / V_e. No boost ideal, V_s = V_e / (1 − D), então D = 1 − V_e / V_s. As duas contas, neste par de tensões, dão o mesmo D.

Fórmula. `D_buck = V_s / V_e, D_boost = 1 − V_e / V_s`

De onde vem. São as relações clássicas de conversão em regime permanente e condução contínua, obtidas da igualdade dos volts-segundo no indutor.

Resolução

1. **Buck.** D_buck = 200 / 400 = 0,50.
2. **Boost.** D_boost = 1 − 200 / 400 = 0,50. Os dois valem 0,50 neste par de tensões.

Resposta. D = 0,50 no buck 400 V → 200 V e no boost 200 V → 400 V, ideais em CCM.

Interpretação. Meio a meio: o transistor conduz metade do período nos dois casos, neste par simétrico de tensões. Na prática a razão cíclica precisa ser um pouco maior, para compensar quedas no indutor e nos semicondutores. O modelo ideal é o ponto de partida.

Erro comum a evitar. Usar D = 200 / 400 também no boost, esquecendo o 1 − V_e / V_s, ou inverter entrada e saída e declarar D = 2, impossível num buck.

20.2. Chopper de um motor CC a 10 kHz (Básico)

Enunciado. Um chopper abaixador alimenta um motor CC com V_cc = 400 V, força contra-eletromotriz E = 200 V e resistência de armadura R = 0,15 Ω, com razão cíclica D = 0,60 e frequência 10 kHz (dados de exemplo). Calcule a tensão média na armadura, a corrente média e o tempo ligado de cada período.

Conceito. A tensão média é D vezes V_cc. A corrente média, em regime, é (V_méd − E) / R. O tempo ligado é D dividido pela frequência, ou D vezes o período.

Fórmula. `V_méd = D V_cc, I_méd = (V_méd − E) / R, t_ligado = D / f`

De onde vem. A tensão média vem da média de um trem de pulsos de amplitude V_cc. A corrente média vem da lei de Ohm na malha da armadura, em regime (a indutância não altera a média). O tempo ligado é a definição de razão cíclica.

Resolução

1. **Tensão média.** V_méd = 0,60 × 400 = 240 V.
2. **Corrente média.** I_méd = (240 − 200) / 0,15 = 40 / 0,15 = 267 A.
3. **Tempo ligado.** T = 1 / 10 000 = 100 µs. t_ligado = 0,60 × 100 = 60 µs.

Resposta. V_méd = 240 V; I_méd = 267 A; t_ligado = 60 µs a 10 kHz.

Interpretação. A 10 kHz o período é 100 µs, e o transistor conduz 60 µs. A corrente de 267 A é a média de regime; a ondulação em torno dela depende da indutância, que este enunciado não pede. Se D cair abaixo de 0,50, V_méd fica menor do que E e a corrente média inverte — o motor passa a gerar.

Erro comum a evitar. Calcular I = 240 / 0,15 = 1 600 A, esquecendo de subtrair E, ou usar t_ligado = 0,60 / 10 = 0,06 s, tratando 10 kHz como 10 Hz.

20.3. Elo CC para 80 kW mecânicos (Básico)

Enunciado. Um inversor entrega 80 kW mecânicos no eixo, com rendimento 0,97, alimentado por um elo de 400 V (dados de exemplo). Qual é a potência no elo CC, a corrente média no elo e a perda do inversor?

Conceito. A potência no elo é a mecânica dividida pelo rendimento. A corrente média é essa potência dividida pela tensão do elo. A perda é a diferença entre as duas potências.

Fórmula. `P_cc = P_mec / η, I_cc = P_cc / V_cc, P_perda = P_cc − P_mec`

De onde vem. É o balanço de potência de um conversor, com a corrente do elo definida por P = V I em corrente contínua.

Resolução

1. **Potência no elo.** P_cc = 80 / 0,97 = 82,47 kW.
2. **Corrente e perda.** I_cc = 82 470 / 400 = 206 A. P_perda = 82,47 − 80 = 2,47 kW.

Resposta. P_cc = 82,47 kW; I_cc = 206 A; perda = 2,47 kW, a 400 V e η = 0,97.

Interpretação. Dois vírgula quarenta e sete quilowatts de perda em 80 kW mecânicos são os 3 % que faltam para 100 %. A corrente de 206 A no elo é o pedido médio à bateria neste ponto — compatível com o pacote do exercício 16.28, e bem abaixo do teto teórico de 1 120 A.

Erro comum a evitar. Multiplicar 80 kW por 0,97 no lugar de dividir, obtendo 77,6 kW no elo, menor do que a potência no eixo, ou calcular I = 80 kW / 400 V = 200 A, esquecendo as perdas.

20.4. Buck de 400 V para 300 V (Básico)

Enunciado. Com o mesmo modelo ideal em CCM do exercício 20.1, qual é a razão cíclica de um buck que abaixa 400 V para 300 V?

Conceito. D = V_s / V_e permanece válido. O valor fica acima de 0,50, porque a saída está mais perto da entrada.

Fórmula. `D = V_s / V_e`

De onde vem. É a mesma relação do exercício 20.1, só com outro ponto de tensão.

Resolução

1. **Razão cíclica.** D = 300 / 400 = 0,75.

Resposta. D = 0,75 no buck 400 V → 300 V, ideal em CCM.

Interpretação. Três quartos do período ligados: o buck passa a maior parte do tempo conduzindo quando a queda de tensão é pequena. É o caso de um pré-regulador que só precisa abaixar um pouco o elo.

Erro comum a evitar. Calcular D = 1 − 300 / 400 = 0,25, aplicando a fórmula do boost no buck.

20.5. Boost de 200 V para 500 V (Básico)

Enunciado. Qual é a razão cíclica de um boost ideal em CCM que eleva 200 V para 500 V?

Conceito. D = 1 − V_e / V_s. Quanto maior o ganho, mais perto de 1 fica a razão cíclica.

Fórmula. `D = 1 − V_e / V_s`

De onde vem. É a inversão da relação do boost do exercício 20.1.

Resolução

1. **Razão cíclica.** D = 1 − 200 / 500 = 1 − 0,40 = 0,60.

Resposta. D = 0,60 no boost 200 V → 500 V, ideal em CCM.

Interpretação. Ganho 2,5 pede D = 0,60, um pouco acima do 0,50 do exercício 20.1 (ganho 2). Empurrar a saída ainda mais alto aproxima D de 1 e deixa a condução crítica — o modelo ideal começa a ficar otimista.

Erro comum a evitar. Calcular D = 500 / 200 = 2,5, que não é uma razão cíclica possível, ou usar 200 / 500 = 0,40 como se fosse um buck.

20.6. Tempo desligado e período do chopper (Básico)

Enunciado. No chopper do exercício 20.2, a 10 kHz e D = 0,60, qual é o período e o tempo desligado de cada ciclo?

Conceito. O período é o inverso da frequência. O tempo desligado é o que sobra depois do tempo ligado, ou (1 − D) vezes o período.

Fórmula. `T = 1 / f, t_desligado = (1 − D) T`

De onde vem. É o complemento do t_ligado já calculado no exercício 20.2.

Resolução

1. **Período e tempo desligado.** T = 1 / 10 000 = 100 µs. t_desligado = 0,40 × 100 = 40 µs.

Resposta. T = 100 µs; t_desligado = 40 µs, a 10 kHz e D = 0,60.

Interpretação. Ligada 60 µs e desligada 40 µs, a chave completa o período de 100 µs. Subir a frequência encurta os dois tempos na mesma proporção e reduz a ondulação de corrente, à custa de mais comutações — e mais perda de chaveamento.

Erro comum a evitar. Declarar t_desligado = 60 µs também, ou calcular T = 10 kHz × 0,60, misturando frequência com razão cíclica.

20.7. Potência média no chopper do exercício 20.2 (Básico)

Enunciado. Com V_méd = 240 V e I_méd = 267 A, qual é a potência elétrica média entregue à armadura? Quanto dessa potência vai para a força contra-eletromotriz E = 200 V, e quanto se dissipa em R = 0,15 Ω?

Conceito. A potência média na armadura é V_méd I_méd. A parcela de E é E I_méd, a potência convertida (mecânica, no modelo estático). A parcela de R é I_méd² R, a perda Joule.

Fórmula. `P = V_méd I_méd, P_E = E I_méd, P_R = I_méd² R`

De onde vem. É o balanço de potência da malha da armadura: V I = E I + I² R, a mesma divisão que já apareceu em máquinas elétricas.

Resolução

1. **As três potências.** P = 240 × 267 = 64,1 kW. P_E = 200 × 267 = 53,4 kW. P_R = 267² × 0,15 = 10,7 kW. A soma 53,4 + 10,7 = 64,1 kW confere.

Resposta. P = 64,1 kW na armadura; P_E = 53,4 kW convertidos; P_R = 10,7 kW dissipados em R.

Interpretação. Dez vírgula sete quilowatts em 0,15 Ω a 267 A são uma perda ôhmica grande: o rendimento desta malha é 53,4 / 64,1 = 83,3 %. É um ponto pesado de corrente. Reduzir R, ou trabalhar com E mais perto de V_méd, corta essa perda no quadrado da corrente.

Erro comum a evitar. Calcular só 240 × 267 e esquecer de partir em E e R, ou usar I² R com 267 mA no lugar de 267 A.

20.8. Razão cíclica para 200 A (Básico)

Enunciado. No mesmo motor do exercício 20.2 (V_cc = 400 V, E = 200 V, R = 0,15 Ω), qual razão cíclica produz corrente média de 200 A?

Conceito. Primeiro acha-se a tensão média que produz essa corrente, V_méd = E + R I, e depois D = V_méd / V_cc.

Fórmula. `V_méd = E + R I, D = V_méd / V_cc`

De onde vem. É a inversão do exercício 20.2: da corrente se tira a tensão, e da tensão, a razão cíclica.

Resolução

1. **Tensão e D.** V_méd = 200 + 0,15 × 200 = 200 + 30 = 230 V. D = 230 / 400 = 0,575.

Resposta. D = 0,575, com V_méd = 230 V, para I_méd = 200 A.

Interpretação. A 200 A a razão cíclica cai um pouco em relação aos 0,60 do exercício 20.2 (267 A). A relação D versus I é linear neste modelo, e D = 0,50 (V_méd = E) é o ponto de corrente nula.

Erro comum a evitar. Fazer D = 200 / 400 = 0,50, usando a corrente no lugar da tensão média, ou calcular V_méd = 200 × 0,15, esquecendo de somar E.

20.9. Correntes de entrada e de saída de um boost de 80 kW (Básico)

Enunciado. Um boost ideal eleva 200 V para 400 V e entrega 80 kW na saída (dados de exemplo, sem perdas). Qual é a corrente de saída e a de entrada?

Conceito. A corrente de saída é P / V_s. Sem perdas, a potência de entrada é a mesma, então a corrente de entrada é P / V_e, o dobro da de saída neste ganho 2.

Fórmula. `I_s = P / V_s, I_e = P / V_e`

De onde vem. É a definição de potência em CC, P = V I, nos dois lados de um conversor ideal.

Resolução

1. **As duas correntes.** I_s = 80 000 / 400 = 200 A. I_e = 80 000 / 200 = 400 A.

Resposta. I_s = 200 A; I_e = 400 A, neste boost ideal de 80 kW.

Interpretação. A entrada em 200 V carrega o dobro da corrente da saída em 400 V. O indutor e a chave do boost precisam ser dimensionados para esses 400 A, não para os 200 A da saída. Com perdas, a corrente de entrada seria ainda um pouco maior.

Erro comum a evitar. Declarar as duas correntes iguais a 200 A, como se a potência não se conservasse, ou inverter entrada e saída.

20.10. Número de pulsos em 1,0 ms (Básico)

Enunciado. A 10 kHz, quantos períodos completos do chopper cabem em 1,00 ms? Qual é o tempo ligado acumulado nesse intervalo, com D = 0,60?

Conceito. O número de períodos é o tempo total vezes a frequência. O tempo ligado acumulado é esse número vezes t_ligado, ou simplesmente D vezes o intervalo.

Fórmula. `N = f t, t_ligado^ac = D t`

De onde vem. É a contagem de ciclos de uma onda periódica, e a definição de razão cíclica aplicada a um intervalo de vários períodos.

Resolução

1. **Pulsos e tempo ligado.** N = 10 000 × 0,001 = 10 períodos. t_ligado acumulado = 0,60 × 1,00 ms = 0,60 ms, ou 10 × 60 µs.

Resposta. N = 10 períodos em 1,00 ms; tempo ligado acumulado = 0,60 ms.

Interpretação. Dez pulsos por milissegundo é o ritmo deste chopper. Em 1 s são 10 000 comutações. Cada uma tem um custo de energia; por isso a frequência não se sobe à toa, mesmo quando isso reduz a ondulação.

Erro comum a evitar. Calcular N = 10 kHz × 1 ms = 10 000, tratando 1 ms como 1 s, ou esquecer de multiplicar o intervalo por D para o tempo ligado acumulado.

20.11. Ondulação de corrente no chopper (Intermediário)

Enunciado. No chopper do exercício 20.2, a indutância de armadura é L = 200 µH (dado de exemplo). Qual é a ondulação pico a pico de corrente no intervalo ligado, com V_cc = 400 V, E = 200 V e t_ligado = 60 µs? Compare com os 267 A médios.

Conceito. Enquanto a chave está ligada, a tensão no indutor é V_cc − E (desprezando R neste intervalo curto). A variação de corrente é (1/L) vezes essa tensão vezes o tempo ligado.

Fórmula. `ΔI = (V_cc − E) t_ligado / L`

De onde vem. Vem da lei do indutor, v_L = L di/dt, integrada no tempo ligado com v_L aproximadamente constante.

Resolução

1. **Ondulação.** ΔI = (400 − 200) × 60 × 10^{-6} / (200 × 10^{-6}) = 200 × 0,30 = 60 A, pico a pico.
2. **Comparar.** 60 A são 22 % de 267 A. A corrente oscila, em primeira ordem, de 237 A a 297 A em torno da média.

Resposta. ΔI = 60 A pico a pico, cerca de 22 % dos 267 A médios.

Interpretação. Sessenta ampères de ondulação já são visíveis, mas a média continua 267 A. Subir a frequência para 20 kHz, com o mesmo D, cortaria t_ligado à metade e a ondulação para 30 A. Aumentar L tem o mesmo efeito, com o custo de volume e de resposta mais lenta.

Erro comum a evitar. Usar V_cc no lugar de V_cc − E, obtendo 120 A, ou esquecer os 10^{-6} e misturar µs com µH de forma inconsistente.

20.12. Razão cíclica no limite de corrente nula e a 400 A (Intermediário)

Enunciado. No motor do exercício 20.2, quais são as razões cíclicas que produzem I_méd = 0 e I_méd = 400 A?

Conceito. É o mesmo método do exercício 20.8, nos dois extremos: corrente nula quando V_méd = E, e 400 A quando V_méd = E + R I.

Fórmula. `D = (E + R I) / V_cc`

De onde vem. A inversão da malha da armadura, aplicada a dois pontos de operação.

Resolução

1. **Corrente nula.** D_0 = 200 / 400 = 0,50.
2. **400 A.** V_méd = 200 + 0,15 × 400 = 260 V. D_400 = 260 / 400 = 0,65.

Resposta. D = 0,50 para I = 0 e D = 0,65 para I = 400 A.

Interpretação. A faixa útil de tração, neste ponto de E, vai de D = 0,50 a pelo menos 0,65. Abaixo de 0,50 a corrente inverte e o motor gera, devolvendo energia ao elo. É o mesmo chopper, só com razão cíclica do outro lado do ponto médio.

Erro comum a evitar. Usar D = 400 / 400 = 1 para 400 A, ou achar que corrente nula pede D = 0.

20.13. Chopper a 20 kHz, mesmo D (Intermediário)

Enunciado. O chopper do exercício 20.2 passa a 20 kHz, com D = 0,60. Quais são o novo período, o novo tempo ligado e a nova ondulação, com L = 200 µH, V_cc = 400 V e E = 200 V? A corrente média muda?

Conceito. D e as tensões médias não mudam, então I_méd permanece 267 A. O período e o tempo ligado caem à metade, e a ondulação também, porque ΔI é proporcional a t_ligado.

Fórmula. `T = 1 / f, t_ligado = D T, ΔI = (V_cc − E) t_ligado / L`

De onde vem. Combina os exercícios 20.2, 20.6 e 20.11, agora com o dobro da frequência.

Resolução

1. **Tempos e ondulação.** T = 50 µs. t_ligado = 0,60 × 50 = 30 µs. ΔI = 200 × 30 × 10^{-6} / (200 × 10^{-6}) = 30 A, metade dos 60 A a 10 kHz. A corrente média continua 267 A.

Resposta. T = 50 µs; t_ligado = 30 µs; ΔI = 30 A. A corrente média permanece 267 A.

Interpretação. Dobrar a frequência corta a ondulação à metade e não mexe na média. O preço são 20 000 comutações por segundo no lugar de 10 000, e a perda de chaveamento tende a dobrar. A escolha de frequência é esse compromisso.

Erro comum a evitar. Achar que I_méd também cai à metade, ou calcular ΔI com t_ligado ainda igual a 60 µs.

20.14. Buck do elo para o pacote a 355,2 V (Intermediário)

Enunciado. Um buck ideal em CCM abaixa o elo de 400 V para a tensão de circuito aberto do pacote, 355,2 V (exercício 15.1). Qual é a razão cíclica?

Conceito. D = V_s / V_e, como no exercício 20.1. A saída está perto da entrada, então D fica alto.

Fórmula. `D = V_s / V_e`

De onde vem. É o buck do exercício 20.1 aplicado à tensão do pacote 96s2p já usada nas baterias.

Resolução

1. **Razão cíclica.** D = 355,2 / 400 = 0,888.

Resposta. D = 0,888 no buck 400 V → 355,2 V, ideal em CCM.

Interpretação. Razão cíclica alta: o conversor quase permanece ligado. Se o pacote cair a 288 V, D cairia a 0,720 e a margem de controle aumentaria. Este buck só faz sentido se o elo estiver de fato acima da tensão do pacote; se os dois forem o mesmo nó, não há conversor no meio.

Erro comum a evitar. Usar a fórmula do boost, D = 1 − 355,2 / 400 = 0,112, ou arredondar 355,2 para 400 e declarar D = 1.

20.15. Boost com rendimento 0,97 e 80 kW na saída (Intermediário)

Enunciado. Repita o exercício 20.9 com rendimento 0,97: a saída continua 80 kW em 400 V, e a entrada é 200 V. Qual é a potência e a corrente de entrada?

Conceito. A potência de entrada é a de saída dividida pelo rendimento. A corrente de entrada é essa potência dividida por 200 V. A de saída permanece 200 A.

Fórmula. `P_e = P_s / η, I_e = P_e / V_e`

De onde vem. É o exercício 20.9 com o mesmo rendimento do inversor do exercício 20.3.

Resolução

1. **Entrada.** P_e = 80 / 0,97 = 82,47 kW. I_e = 82 470 / 200 = 412 A, 12 A acima dos 400 A do caso ideal. I_s permanece 200 A.

Resposta. P_e = 82,47 kW; I_e = 412 A; I_s = 200 A.

Interpretação. Os 3 % de perda pedem 12 A a mais na entrada de 200 V. A chave e o indutor precisam ser pensados nesse valor, não nos 400 A ideais. É o mesmo 82,47 kW do exercício 20.3, agora visto do lado de baixa tensão do boost.

Erro comum a evitar. Manter I_e = 400 A e só reduzir a saída, ou calcular I_e = 82,47 kW / 400 V, usando a tensão de saída na entrada.

20.16. Tempo morto de 2 µs a 10 kHz (Intermediário)

Enunciado. Um inversor em 10 kHz introduz 2,0 µs de tempo morto em cada período (dado de exemplo). Que fração do período é essa? Se o tempo morto reduzir a razão cíclica efetiva em 2,0 µs / T, quanto cai V_méd de um chopper com D comandado = 0,60 e V_cc = 400 V?

Conceito. O período é 100 µs, então 2,0 µs são 2,0 % do período. A razão cíclica efetiva cai para 0,60 − 0,020 = 0,58, e a tensão média efetiva é D_ef V_cc.

Fórmula. `δ = t_morto / T, V_méd^ef = (D − δ) V_cc`

De onde vem. O tempo morto evita curtocircuito da ponte e estreita o pulso efetivo. Este modelo atribui toda a perda de pulso à razão cíclica, uma primeira aproximação.

Resolução

1. **Fração e tensão.** T = 100 µs. δ = 2,0 / 100 = 0,020 = 2,0 %. D_ef = 0,60 − 0,020 = 0,58. V_méd^ef = 0,58 × 400 = 232 V, 8 V abaixo dos 240 V ideais.

Resposta. O tempo morto vale 2,0 % do período; V_méd efetiva cai para 232 V, 8 V abaixo de 240 V.

Interpretação. Oito volts em 240 V são 3,3 % de erro de tensão, só pelo tempo morto. A 20 kHz o mesmo 2,0 µs viraria 4,0 % do período e o erro dobraria. Por isso o tempo morto precisa ser o menor seguro, e o controle costuma compensar essa queda.

Erro comum a evitar. Somar 2,0 µs a t_ligado no lugar de subtrair, ou calcular 2,0 µs / 10 kHz misturando unidades.

20.17. Tensão de linha eficaz de um inversor SPWM (Intermediário)

Enunciado. Um inversor trifásico em PWM senoidal, com índice de modulação m = 0,90 e elo de 400 V (dados de exemplo, sem sobremodulação), qual é a tensão eficaz de linha na saída? Use $V_{L,ef} = m V_{cc} \sqrt{3} / (2 \sqrt{2})$.

Conceito. A amplitude de fase, no SPWM linear, chega a m V_{cc} / 2. A tensão eficaz de linha é essa amplitude vezes √3 / √2, o que reduz à fórmula dada.

Fórmula. $V_{L,ef} = m V_{cc} \sqrt{3} / (2 \sqrt{2})$

De onde vem. É a relação clássica do PWM senoidal na região linear (m ≤ 1), medida em tensão de linha eficaz.

Resolução

1. **Tensão de linha.** √3 / (2√2) = 0,6124. $V_{L,ef}$ = 0,90 × 400 × 0,6124 = 220 V.

Resposta. $V_{L,ef}$ = 220 V, com m = 0,90 e V_{cc} = 400 V, neste modelo SPWM linear.

Interpretação. Duzentos e vinte volts eficazes de linha cabem em um motor projetado para 220 V, alimentado por um elo de 400 V. Com m = 1, o teto linear seria 245 V. Para subir mais, entra a sobremodulação ou um elo mais alto, com o custo de mais harmônicos.

Erro comum a evitar. Calcular m × 400 = 360 V e tratar isso como eficaz de linha, ou usar $V_{cc} / \sqrt{2}$ = 283 V, como se o elo fosse uma senóide.

20.18. Energia armazenada no capacitor do elo (Intermediário)

Enunciado. O elo de 400 V tem um capacitor de 1 000 µF (dado de exemplo). Qual é a energia armazenada? Se um pulso de 80 kW for tirado só desse capacitor, em quanto tempo a tensão cairia, neste modelo grosseiro de energia constante por tempo?

Conceito. A energia do capacitor é (1/2) C V^2. O tempo de um pulso, se toda essa energia fosse gasta a 80 kW, é E / P — um limite inferior, porque a tensão não pode ir a zero no elo.

Fórmula. $E = (1/2) C V^2$, $t = E / P$

De onde vem. É a energia eletrostática do capacitor, comparada a uma potência constante como ordem de grandeza do ‘hold-up’ do elo.

Resolução

1. **Energia.** E = 0,5 × 0,0010 × 400^2 = 0,5 × 0,0010 × 160 000 = 80 J = 0,0222 Wh.
2. **Tempo a 80 kW.** t = 80 / 80 000 = 0,0010 s = 1,0 ms. É só um limite: na prática a tensão do elo não pode cair até zero.

Resposta. E = 80 J; o teto grosseiro a 80 kW é 1,0 ms até zerar o capacitor.

Interpretação. Oitenta joules são pouca energia: o capacitor do elo não é uma bateria, é um filtro de comutação e de pulsos curtos. Para segurar 80 kW por dezenas de milissegundos, a capacitância precisaria ser dezenas de vezes maior, ou a bateria tem de responder com o elo.

Erro comum a evitar. Calcular C V^2 = 160 J, esquecendo o 1/2, ou converter 80 J em 80 kWh.

20.19. Chopper em geração, D = 0,40 (Intermediário)

Enunciado. No mesmo motor do exercício 20.2, a razão cíclica cai para 0,40, com E ainda igual a 200 V. Qual é a tensão média, a corrente média e o sentido dessa corrente?

Conceito. V_méd = D V_cc fica abaixo de E, então I_méd = (V_méd − E) / R é negativa: a armadura entrega corrente ao elo, e o motor gera.

Fórmula. `V_méd = D V_cc, I_méd = (V_méd − E) / R`

De onde vem. É o exercício 20.2 do outro lado do ponto D = 0,50, o modo de recuperação.

Resolução

1. **Tensão e corrente.** V_méd = 0,40 × 400 = 160 V. I_méd = (160 − 200) / 0,15 = −40 / 0,15 = −267 A, corrente no sentido da geração.

Resposta. V_méd = 160 V; I_méd = −267 A, no sentido da geração.

Interpretação. A simetria com o exercício 20.2 é exata neste modelo: D = 0,40 é o espelho de D = 0,60 em torno de 0,50, e a corrente só troca de sinal. A potência em E é 200 × 267 = 53,4 kW gerados; depois da perda em R, 160 × 267 = 42,7 kW chegam ao elo.

Erro comum a evitar. Manter I = +267 A, ou calcular I = (200 − 160) / 0,15 e esquecer o sinal, que indica o sentido.

20.20. Energia perdida no inversor em 10 s a 80 kW (Intermediário)

Enunciado. Com a perda de 2,47 kW do exercício 20.3, quanta energia o inversor dissipa em 10,0 s a este ponto de 80 kW mecânicos?

Conceito. A energia é a potência de perda vezes o tempo. Dez segundos a 2,47 kW são uma conta direta, útil para dimensionar o dissipador em um pulso curto.

Fórmula. `E_perda = P_perda t`

De onde vem. É a definição de energia como integral da potência, aqui constante no pulso.

Resolução

1. **Energia dissipada.** E_perda = 2,47 kW × 10,0 s = 24,7 kJ = 6,86 Wh.

Resposta. E_perda = 24,7 kJ, ou 6,86 Wh, em 10,0 s.

Interpretação. Quase sete watthoras em dez segundos não esvaziam a bateria, mas aquecem o módulo de potência. Em regime contínuo, esses 2,47 kW precisam de refrigeração permanente; num pulso curto, a inércia térmica do encapsulamento pode bastar.

Erro comum a evitar. Multiplicar 2,47 kW por 10 min no lugar de 10 s, ou declarar 2,47 kWh, tratando os 10 s como 1 h.

20.21. Indutância para limitar a ondulação a 30 A (Desafio)

Enunciado. No chopper do exercício 20.2, a 10 kHz, D = 0,60, V_cc = 400 V e E = 200 V, qual indutância limita a ondulação pico a pico a 30 A?

Conceito. Isola-se L da fórmula do exercício 20.11: L = (V_cc − E) t_ligado / ΔI. Com t_ligado = 60 µs, a indutância sai direto.

Fórmula. `L = (V_cc − E) t_ligado / ΔI`

De onde vem. É a inversão do exercício 20.11, com a ondulação imposta como requisito.

Resolução

1. **Indutância mínima.** L = 200 × 60 × 10^{-6} / 30 = 0,00040 H = 400 µH, o dobro dos 200 µH que davam 60 A.

Resposta. L = 400 µH para ΔI = 30 A, nestas condições.

Interpretação. O dobro da indutância corta a ondulação à metade, o mesmo efeito de dobrar a frequência no exercício 20.13. A escolha entre L maior e f maior é de volume, custo e perda de chaveamento.

Erro comum a evitar. Usar L = (V_cc) t / ΔI, sem subtrair E, ou esquecer de passar 60 µs para segundos e obter 0,40 µH.

20.22. Elo mínimo para 380 V de linha em SPWM linear (Desafio)

Enunciado. Quer-se 380 V eficazes de linha na saída de um inversor SPWM, ainda na região linear (m ≤ 1). Qual é a menor tensão de elo, usando a mesma fórmula do exercício 20.17? O elo de 400 V basta?

Conceito. No teto linear, m = 1 e V_L,ef = V_cc × 0,6124. Isola-se V_cc = V_L,ef / 0,6124. Compara-se com 400 V.

Fórmula. `V_cc^mín = V_L,ef × 2 √2 / √3`

De onde vem. É a inversão da relação SPWM do exercício 20.17, no limite m = 1.

Resolução

1. **Elo mínimo e comparação.** V_cc^mín = 380 / 0,6124 = 621 V. O elo de 400 V não basta: em m = 1 ele entrega só 245 V de linha.

Resposta. V_cc^mín = 621 V em SPWM linear; o elo de 400 V não basta (teto de 245 V de linha).

Interpretação. Um motor de 380 V pede elo da ordem de 600 V ou mais, ou outra modulação (sobremodulação, vetorial com injeção de terceiro harmônico, que ganha uns 15 %). O pacote de 355 V do up! ilustrativo casa melhor com um motor de 220 V, como no exercício 20.17.

Erro comum a evitar. Calcular V_cc = 380 × √2 = 537 V, como se fosse um retificador monofásico, ou concluir que 400 V já entrega 380 V de linha.

20.23. Corrente de fase para 80 kW em 220 V de linha (Desafio)

Enunciado. O inversor do exercício 20.3 entrega 80 kW mecânicos com η = 0,97. A tensão de linha eficaz é 220 V e o fator de potência no motor é 0,95 (dados de exemplo). Qual é a corrente eficaz de fase?

Conceito. A potência elétrica no elo, 82,47 kW, é também √3 V_L I fp, em regime senoidal equilibrado. Isola-se I = P_el / (√3 V_L fp).

Fórmula. `I = P_el / (√3 V_L fp)`

De onde vem. É a expressão clássica da potência ativa trifásica, aplicada à saída do inversor, com P_el já calculada no exercício 20.3.

Resolução

1. **Corrente de fase.** I = 82 470 / (1,732 × 220 × 0,95) = 82 470 / 362,3 = 228 A eficazes.

Resposta. I = 228 A eficazes por fase, neste ponto de 80 kW mecânicos.

Interpretação. Duzentos e vinte e oito ampères eficazes são o pedido aos cabos e aos braços do inversor. A corrente no elo era 206 A em CC; as duas não se comparam direto, porque uma é contínua e a outra, alternada trifásica, mas a ordem de grandeza é a mesma, como o balanço de potência exige.

Erro comum a evitar. Usar 80 kW no lugar de 82,47 kW, ou esquecer o √3 e calcular 82 470 / (220 × 0,95) = 395 A.

20.24. Hold-up do elo para 5 % de queda (Desafio)

Enunciado. O capacitor de 1 000 µF do exercício 20.18 está em 400 V. Quanta energia se libera quando a tensão cai 5 %, para 380 V? Em quanto tempo essa energia cobre 80 kW, neste modelo?

Conceito. A energia liberada é a diferença (1/2) C (V_i² − V_f²), não 5 % de 80 J, porque a energia vai com o quadrado da tensão. O tempo é essa energia dividida pela potência.

Fórmula. `ΔE = (1/2) C (V_i² − V_f²), t = ΔE / P`

De onde vem. É o exercício 20.18 com uma queda de tensão admissível, o critério usual de hold-up do elo, em vez de zerar o capacitor.

Resolução

1. **Energia liberada.** ΔE = 0,5 × 0,0010 × (400² − 380²) = 0,00050 × (160 000 − 144 400) = 7,80 J.
2. **Tempo a 80 kW.** t = 7,80 / 80 000 = 97,5 µs, cerca de um período a 10 kHz.

Resposta. ΔE = 7,80 J; t = 97,5 µs a 80 kW, para uma queda de 5 %.

Interpretação. Sete vírgula oito joules são 9,8 % dos 80 J armazenados, não 5 %, porque 1 − 0,95² = 0,0975. E 97,5 µs mal cobrem um período de 10 kHz: o capacitor filtra a comutação, não um buraco de dezenas de milissegundos na bateria.

Erro comum a evitar. Tomar 5 % de 80 J = 4,0 J, como se a energia fosse linear com a tensão, ou usar 80 J outra vez, zerando o elo.

20.25. Elevação de temperatura com 2,47 kW de perda (Desafio)

Enunciado. O módulo de potência tem resistência térmica encapsulamento-ambiente de 0,015 K/W (dado de exemplo), em regime. Qual é a elevação de temperatura causada pelos 2,47 kW de perda do exercício 20.3?

Conceito. Em regime, ΔT = R_th P_perda. A temperatura do encapsulamento sobe esse valor acima do ambiente.

Fórmula. `ΔT = R_th P_perda`

De onde vem. É o modelo térmico resistivo clássico, análogo à lei de Ohm, usado no dimensionamento de dissipador.

Resolução

1. **Elevação.** ΔT = 0,015 × 2 470 = 37,1 K.

Resposta. ΔT = 37,1 K em regime, com R_th = 0,015 K/W.

Interpretação. Trinta e sete kelvin acima do ambiente, a 40 °C de ar, levam o encapsulamento a cerca de 77 °C, ainda razoável. Se R_th subir para 0,030 K/W (dissipador pior ou menor vazão de água), ΔT vai a 74 K e a margem some. A perda de 2,47 kW não é ‘pequena’ para o térmico, só para o rendimento.

Erro comum a evitar. Multiplicar 0,015 por 2,47 kW e declarar 0,037 K, esquecendo de passar a perda para watts, ou usar 2,47 W no lugar de 2,47 kW.

20.26. Condição de condução contínua no boost (Desafio)

Enunciado. Um boost de 200 V para 400 V, D = 0,50, opera a 10 kHz com L = 200 µH e corrente média de entrada 400 A (exercício 20.9). A ondulação pico a pico da corrente no indutor é ΔI = V_e D T / L. O conversor permanece em CCM se I_e for maior do que ΔI / 2. Permanece?

Conceito. Calcula-se ΔI e compara-se I_e com ΔI / 2, o limiar em que a corrente do indutor toca zero.

Fórmula. `ΔI = V_e D T / L, CCM quando I_e − ΔI / 2 é positivo`

De onde vem. A ondulação do indutor no boost, no intervalo ligado, é V_e t_ligado / L. O critério de CCM é o da corrente média maior do que metade da ondulação.

Resolução

1. **Ondulação.** T = 100 µs. ΔI = 200 × 0,50 × 100 × 10^{-6} / (200 × 10^{-6}) = 50 A.
2. **Critério.** ΔI / 2 = 25 A, bem abaixo dos 400 A de entrada: permanece em CCM, com folga.

Resposta. ΔI = 50 A; ΔI / 2 = 25 A, abaixo de 400 A: permanece em CCM, com folga.

Interpretação. A 80 kW este boost está profundamente em condução contínua. O CCM só seria ameaçado em carga muito leve — por exemplo, abaixo de 25 A de entrada, ou 5 kW na entrada de 200 V. As fórmulas do exercício 20.1, que assumem CCM, valem neste ponto.

Erro comum a evitar. Comparar 400 A com os 50 A inteiros no lugar de 25 A, ou calcular ΔI com V_s no lugar de V_e.

20.27. Perda de chaveamento aproximada (Desafio)

Enunciado. Uma estimativa ilustrativa da perda de chaveamento de um braço é P_sw = V I t_com f, com t_com o tempo equivalente de comutação. Com V = 400 V, I = 206 A, t_com = 200 ns e f = 10 kHz (dados de exemplo), qual é essa perda? Compare com os 2,47 kW totais do exercício 20.3.

Conceito. A energia de uma comutação, neste modelo, é V I t_com, e a potência é essa energia vezes a frequência. É uma ordem de grandeza, não o modelo completo do transistor.

Fórmula. `P_sw = V I t_com f`

De onde vem. Aproxima a área do triângulo de comutação por um retângulo equivalente de duração t_com, o primeiro palpite usual de perda de chaveamento.

Resolução

1. **Perda e comparação.** P_sw = 400 × 206 × 200 × 10^{-9} × 10 000 = 164,8 W = 0,165 kW, cerca de 6,7 % dos 2,47 kW totais — neste ponto, a perda de condução ainda domina.

Resposta. P_sw = 0,165 kW, cerca de 6,7 % dos 2,47 kW totais, neste modelo e neste ponto.

Interpretação. A 10 kHz a comutação ainda é uma fatia menor. A 20 kHz, no mesmo modelo, P_sw dobra para 0,330 kW e a fração sobe. Por isso o exercício 20.13, que ganhava ondulação ao dobrar a frequência, precisa incluir este custo.

Erro comum a evitar. Esquecer os 10^{-9} do nanossegundo e declarar milhares de quilowatts, ou usar 2,47 kW como se já fosse só chaveamento.

20.28. Rendimento da malha da armadura em geração (Desafio)

Enunciado. No modo geração do exercício 20.19, a armadura entrega 53,4 kW em E e o elo recebe 42,7 kW (160 V × 267 A). Qual é o rendimento dessa malha, da força contra-eletromotriz até o elo? Compare com os 83,3 % do exercício 20.7, em tração.

Conceito. O rendimento em geração é a potência que chega ao elo dividida pela potência gerada em E. A perda $I^2 R$ é a mesma, 10,7 kW, então o rendimento cai: agora a perda se desconta de 53,4 kW, não de 64,1 kW.

Fórmula. `η_ger = P_elo / P_E`

De onde vem. É o balanço do exercício 20.7 no sentido inverso, com os números já obtidos no exercício 20.19.

Resolução

1. **Rendimento em geração.** η_ger = 42,7 / 53,4 = 0,800 = 80,0 %, 3,3 pontos abaixo dos 83,3 % em tração, com a mesma corrente e a mesma perda em R.

Resposta. η_ger = 80,0 %, 3,3 pontos abaixo dos 83,3 % em tração, neste mesmo ponto de 267 A.

Interpretação. A perda ôhmica é a mesma nos dois sentidos; o rendimento piora na geração porque a potência útil de referência é menor (53,4 kW, não 64,1 kW). É um dos motivos de o η_rec da modelagem (0,65) ser menor do que o η de tração (0,855): além do inversor, a malha da máquina também rende menos no caminho de volta.

Erro comum a evitar. Repetir 83,3 % nos dois sentidos, ou calcular 42,7 / 64,1, usando a potência de tração como denominador da geração.

20.29. Corrente no buck de 80 kW a 355,2 V (Desafio)

Enunciado. O buck do exercício 20.14, de 400 V para 355,2 V, entrega 80 kW no lado do pacote, com rendimento 0,97. Qual é a corrente de saída e a de entrada?

Conceito. A corrente de saída é 80 kW / 355,2 V. A potência de entrada é 80 / 0,97, e a corrente de entrada é essa potência dividida por 400 V.

Fórmula. `I_s = P_s / V_s, I_e = (P_s / η) / V_e`

De onde vem. É o mesmo balanço do exercício 20.15, agora no buck que desce do elo ao pacote.

Resolução

1. **Correntes.** I_s = 80 000 / 355,2 = 225 A. P_e = 82,47 kW. I_e = 82 470 / 400 = 206 A, a mesma corrente do elo do exercício 20.3, como o balanço exige.

Resposta. I_s = 225 A no pacote; I_e = 206 A no elo de 400 V, com η = 0,97.

Interpretação. Duzentos e vinte e cinco ampères no pacote batem com o ponto de 80 kW já usado nas baterias e na recarga. A entrada em 400 V pede os mesmos 206 A do inversor do exercício 20.3 — duas formas de ver o mesmo 82,47 kW no elo.

Erro comum a evitar. Calcular I_s = 80 kW / 400 V = 200 A, usando a tensão do elo no lado do pacote, ou esquecer o rendimento na corrente de entrada.

20.30. Síntese: do D ao elo CC (Desafio)

Enunciado. Reúna os três resultados originais desta disciplina e o que eles significam no up! ilustrativo: D = 0,50 no buck e no boost ideais; V_méd = 240 V, I_méd = 267 A e t_ligado = 60 µs no chopper; P_cc = 82,47 kW, I_cc = 206 A e 2,47 kW de perda no inversor a 80 kW mecânicos. O elo de 400 V é compatível com o teto de 1 120 A do pacote (exercício 15.21)?

Conceito. Os três números já foram calculados. A corrente de 206 A no elo se compara com o teto de 1 120 A: há folga ampla neste ponto contínuo de 80 kW.

Fórmula. `I_cc = P_mec / (η V_cc)`

De onde vem. É o fecho da disciplina: conversão, chopper e elo, ligados ao pacote já dimensionado nas baterias.

Resolução

1. **Os três blocos.** Buck e boost ideais: D = 0,50 neste par 200 V / 400 V. Chopper: 240 V, 267 A, 60 µs a 10 kHz. Inversor: 82,47 kW no elo, 206 A, 2,47 kW de perda.
2. **Compatibilidade com o pacote.** 206 A no elo é cerca de 18 % dos 1 120 A de teto teórico: o pacote aceita este ponto com folga, como já se viu no exercício 16.28 para 150 kW.

Resposta. D = 0,50 no buck e no boost; chopper 240 V, 267 A, 60 µs; elo 82,47 kW, 206 A e 2,47 kW de perda. Os 206 A cabem folgados nos 1 120 A de teto do pacote (cerca de 18 %).

Interpretação. Esta disciplina fecha assim: a razão cíclica define a tensão, a malha da armadura define a corrente, e o rendimento liga o eixo ao elo e ao pacote. Os 80 kW mecânicos pedem 82,47 kW no elo e 206 A a 400 V — um ponto contínuo confortável para o up! ilustrativo, com a perda de 2,47 kW indo para o térmico do inversor.

Erro comum a evitar. Comparar 267 A do chopper com o teto de 1 120 A como se fossem o mesmo ramo, ou tratar 206 A como se já estivesse no limite do pacote.

Testes e Homologação de VE/VH (8 h)

21.1. O que entra na homologação de um VE (Básico)

Enunciado. Liste, com uma linha de contexto cada, quatro frentes típicas de ensaio e homologação de um veículo leve elétrico, além dos testes que um carro a combustão já faria (freio, crash, ruído, etc.).

Conceito. A homologação de um VE reaproveita os ensaios ‘de carro’ e acrescenta frentes próprias da alta tensão, da eletrônica de potência e da energia da rede. As quatro listadas aqui são o recorte usual, não um checklist oficial fechado.

Fórmula. `quatro frentes além dos ensaios de carro`

De onde vem. É o mapa das regulamentações típicas de um VE leve: UNECE R100, UNECE R10, medição de consumo e recarga, e o rito local (Contran e, quando couber, Inmetro).

Resolução

1. **Segurança elétrica (UNECE R100 e correlatas).** Isolamento, proteção contra choque, intertravamento, descarga do elo CC e integridade do pacote após ensaio de impacto.
2. **Compatibilidade eletromagnética (UNECE R10).** O inversor e o carregador não podem irradiar nem sucumbir a interferência que prejudique funções de segurança.
3. **Consumo, autonomia e recarga.** Medição em ciclo (por exemplo WLTP ou o ciclo vigente no país), energia da rede e tempo ou potência de recarga.
4. **Marcos no Brasil.** O caminho prático envolve normas técnicas, requisitos do Contran e, quando couber, regulamentação do Inmetro; o detalhe vigente deve ser conferido na regulação atual, porque esse quadro muda.

Resposta. Além dos ensaios ‘de carro’, um VE precisa demonstrar segurança elétrica (R100), EMC (R10), consumo/autonomia/recarga e atender o rito local (Contran/Inmetro, conforme o caso).

Interpretação. Freio, crash e ruído continuam valendo. O que o VE acrescenta é a alta tensão, a compatibilidade do inversor e do carregador, a medição da energia e o rito local. Os exercícios seguintes numericizam consumo, isolamento e recarga.

Erro comum a evitar. Achar que um VE só precisa dos ensaios de um carro a combustão, ou tratar R100, R10 e o ciclo de consumo como se fossem o mesmo ensaio.

21.2. Autonomia a partir do ensaio de consumo (Básico)

Enunciado. No ensaio, o consumo medido na bateria foi 13,5 kWh/100 km e a energia útil é 31,0 kWh. Qual autonomia se declara a partir desses números? Se o rendimento do carregador é 0,90, qual é o consumo equivalente na rede?

Conceito. A autonomia declarada é a energia útil dividida pelo consumo da bateria no ciclo. O consumo na rede é o da bateria dividido pelo rendimento do carregador: é o que aparece na conta de luz.

Fórmula. `A = 100 E_útil / c_bat, c_rede = c_bat / η_chg`

De onde vem. Vem da definição de consumo, isolando a distância, e do balanço de energia da recarga: a rede entrega mais do que entra no pacote.

Resolução

1. **Autonomia.** A = 31,0 / 0,135 = 229,6 km, que se declara 230 km.
2. **Consumo na tomada.** c_rede = 13,5 / 0,90 = 15,0 kWh/100 km. É este o número que o dono vê na conta de luz, não o da bateria.

Resposta. Autonomia = 230 km (229,6 km). Consumo na rede = 15,0 kWh/100 km.

Interpretação. Os 31,0 kWh deste ensaio são um recorte útil um pouco abaixo dos 32,0 kWh da modelagem: a autonomia cai de 237 km (exercício 21.5) para 230 km. E os 15,0 kWh/100 km da rede são 11 % maiores do que os 13,5 kWh/100 km medidos na bateria, só por causa do carregador.

Erro comum a evitar. Declarar 31,0 / 13,5 = 2,30 km, esquecendo que 13,5 kWh/100 km é 0,135 kWh/km, ou usar 13,5 kWh/100 km como se já fosse o da rede.

21.3. Ensaio de isolamento e rendimento de recarga (Básico)

Enunciado. Um megôhmetro aplica 500 V e lê 5,0 MΩ entre o barramento HV e a carroceria de um pacote de 400 V. A resistência específica atende 100 Ω/V? À parte, a recarga põe 36,0 kWh na conta da rede e 32,0 kWh na bateria. Qual é o rendimento?

Conceito. A resistência específica é a resistência lida dividida pela tensão nominal do pacote, não pela tensão do megôhmetro. O rendimento de recarga é a energia que entra na bateria dividida pela energia medida na rede.

Fórmula. `r = R / V_pacote, η = E_bat / E_rede`

De onde vem. O critério 100 Ω/V é o limiar clássico de isolamento em função da tensão do sistema. O rendimento é o balanço direto das duas energias do ensaio de recarga.

Resolução

1. **Isolamento específico.** $r = 5{,}0\times10^{6} / 400 = 12\,500$ Ω/V, bem acima de 100 Ω/V. Atende com folga.
2. **Rendimento de recarga.** $\eta = 32{,}0 / 36{,}0 = 0{,}889$, ou 88,9 %.

Resposta. Isolamento: 12 500 Ω/V, aprovado no critério 100 Ω/V. Rendimento de recarga: 88,9 %.

Interpretação. Doze mil e quinhentos ohms por volt são 125 vezes o piso de 100 Ω/V: o isolamento, neste ensaio, não é o ponto apertado. Já os 88,9 % de recarga são um pouco abaixo dos 0,90 do exercício 21.2 e explicam os 36,0 kWh na conta para repor 32,0 kWh no pacote.

Erro comum a evitar. Dividir 5,0 MΩ pelos 500 V do megôhmetro (10 000 Ω/V) no lugar da tensão do pacote, ou calcular o rendimento como 36,0 / 32,0 = 112,5 %.

21.4. Folga do isolamento e resistência mínima (Básico)

Enunciado. Com os 12 500 Ω/V do exercício 21.3, quantas vezes o isolamento supera o piso de 100 Ω/V? Qual seria a resistência mínima aceitável num pacote de 400 V?

Conceito. A folga é a razão r / r_mín. A resistência mínima é o piso específico vezes a tensão do pacote.

Fórmula. `folga = r / r_mín, R_mín = r_mín V_pacote`

De onde vem. É a leitura do exercício 21.3 em folga e em ohms absolutos, o que o ensaiador compara com a escala do megôhmetro.

Resolução

1. **Folga e mínimo.** folga = 12 500 / 100 = 125. R_mín = 100 × 400 = 40,0 kΩ. Os 5,0 MΩ lidos são $5{,}0\times10^{6} / 40{,}0\times10^{3} = 125$ vezes esse mínimo, o mesmo fator.

Resposta. Folga = 125 vezes o piso. R_mín = 40,0 kΩ a 400 V.

Interpretação. Quarenta quilohms é um piso baixo para um megôhmetro que lê megaohms: 5,0 MΩ passa com folga de 125 vezes. O ensaio só aperta se a resistência cair muito, como no exercício 21.17, com umidade.

Erro comum a evitar. Declarar R_mín = 100 Ω, esquecendo de multiplicar pelos 400 V, ou tratar 12 500 Ω/V como se já fosse a resistência lida.

21.5. Autonomia com 32,0 kWh úteis no mesmo ciclo (Básico)

Enunciado. Se a energia útil fosse 32,0 kWh, como na modelagem, e o consumo no ensaio continuasse 13,5 kWh/100 km, qual autonomia se obteria? Compare com os 230 km do exercício 21.2.

Conceito. A autonomia escala com a energia útil, no mesmo consumo. A diferença para o exercício 21.2 é só o recorte de 31,0 kWh contra 32,0 kWh.

Fórmula. `A = 100 E_útil / c_bat`

De onde vem. É a mesma regra de três do exercício 21.2, trocando 31,0 kWh pelos 32,0 kWh usados na modelagem.

Resolução

1. **Autonomia e diferença.** A = 100 × 32,0 / 13,5 = 237,0 km, 7 km acima dos 230 km (229,6 km) do exercício 21.2. A razão 32,0 / 31,0 = 1,032 reproduz 229,6 × 1,032 = 237,0 km.

Resposta. A = 237 km (237,0 km), 7 km acima dos 230 km do exercício 21.2, só pela energia útil de 32,0 kWh no lugar de 31,0 kWh.

Interpretação. Um quilowatt-hora a mais, neste consumo, vale cerca de 7,4 km. Por isso o número que entra no comunicado de homologação precisa deixar claro se é energia útil de ensaio (31,0 kWh) ou o recorte de 32,0 kWh da modelagem.

Erro comum a evitar. Repetir 230 km, como se os 32,0 kWh não mudassem a conta, ou calcular 32,0 / 13,5 = 2,37 km, outra vez sem o fator 100.

21.6. Tempo de recarga dos 36,0 kWh da rede (Básico)

Enunciado. A recarga do exercício 21.3 tira 36,0 kWh da rede. Em uma parede de 7,4 kW (dado de exemplo), quanto tempo dura essa recarga, se a potência for constante?

Conceito. O tempo é a energia da rede dividida pela potência média na tomada. Potência constante é o modelo didático; na prática o carregador pode reduzir a potência no fim.

Fórmula. `t = E_rede / P`

De onde vem. É a definição de potência média, P = E / t, isolando o tempo, com a energia já medida no exercício 21.3.

Resolução

1. **Tempo.** t = 36,0 / 7,4 = 4,86 h, ou 4 h 52 min.

Resposta. t = 4,86 h, ou 4 h 52 min, a 7,4 kW constantes.

Interpretação. Quase cinco horas para repor 32,0 kWh no pacote, com 4,0 kWh perdidos no caminho: é o retrato de uma recarga AC residencial típica. A 22 kW, no mesmo modelo, o tempo cairia para 1,64 h.

Erro comum a evitar. Dividir 32,0 kWh, a energia da bateria, por 7,4 kW, o que daria 4,32 h e ignoraria as perdas do carregador já medidas na rede.

21.7. Ensaio a 13,0 kWh/100 km (Básico)

Enunciado. Se o ciclo do exercício 21.2 tivesse medido 13,0 kWh/100 km na bateria, com os mesmos 31,0 kWh úteis e η_chg = 0,90, qual seria a autonomia declarada e o consumo na rede?

Conceito. A autonomia sobe quando o consumo cai, na razão inversa. O consumo na rede acompanha o da bateria, dividido pelo mesmo rendimento.

Fórmula. `A = 100 E_útil / c_bat, c_rede = c_bat / η_chg`

De onde vem. É o exercício 21.2 com o consumo 13,0 kWh/100 km já usado na disciplina de estado da arte, no lugar de 13,5.

Resolução

1. **Autonomia e rede.** A = 100 × 31,0 / 13,0 = 238,5 km, que se declara 238 km. c_rede = 13,0 / 0,90 = 14,4 kWh/100 km.

Resposta. Autonomia = 238 km (238,5 km). Consumo na rede = 14,4 kWh/100 km.

Interpretação. Meio quilowatt-hora a menos por 100 km vale 8,9 km a mais de autonomia neste recorte (238,5 contra 229,6). O comunicado é sensível a poucas décimas no consumo medido.

Erro comum a evitar. Repetir os 230 km e os 15,0 kWh/100 km do exercício 21.2, sem refazer a conta com 13,0.

21.8. Isolamento do pacote de 355,2 V (Básico)

Enunciado. A mesma leitura de 5,0 MΩ do exercício 21.3 é feita num pacote de 355,2 V (96s, 3,70 V por célula). Qual é a resistência específica? Continua aprovada no critério 100 Ω/V?

Conceito. A resistência específica usa a tensão nominal do pacote. Uma tensão um pouco menor aumenta r e amplia a folga, com a mesma resistência lida.

Fórmula. `r = R / V_pacote`

De onde vem. É o ensaio 21.3 com a tensão 355,2 V já usada nas baterias e no buck do exercício 20.14, no lugar de 400 V.

Resolução

1. **Resistência específica.** r = 5,0×10⁶ / 355,2 = 14 077 Ω/V, ainda bem acima de 100 Ω/V: aprovado, com folga um pouco maior do que os 12 500 Ω/V a 400 V.

Resposta. r = 14 077 Ω/V, aprovado no critério 100 Ω/V.

Interpretação. A 355,2 V a mesma leitura rende 14 077 Ω/V, cerca de 12 % acima dos 12 500 Ω/V a 400 V. O critério específico aperta quando a tensão do sistema sobe, como no exercício 21.26, a 800 V.

Erro comum a evitar. Continuar dividindo por 400 V, ou usar 3,70 V da célula no denominador no lugar da tensão do pacote.

21.9. Energia da rede para repor 31,0 kWh (Básico)

Enunciado. Para devolver ao pacote os 31,0 kWh úteis do ensaio 21.2, com rendimento do carregador 0,90, quanta energia se tira da rede?

Conceito. A energia na rede é a energia útil dividida pelo rendimento. É o complemento do consumo em kWh/100 km: agora o recorte é a recarga completa da janela de ensaio.

Fórmula. `E_rede = E_útil / η_chg`

De onde vem. É o mesmo balanço do exercício 21.3, aplicado aos 31,0 kWh e ao η = 0,90 do exercício 21.2, no lugar de 32,0 kWh e 88,9 %.

Resolução

1. **Energia na rede.** E_rede = 31,0 / 0,90 = 34,4 kWh.

Resposta. E_rede = 34,4 kWh para repor 31,0 kWh, com η_chg = 0,90.

Interpretação. Três vírgula quatro quilowatts-hora se perdem na recarga desta janela. No exercício 21.3, com 32,0 kWh e 88,9 %, a conta da rede era 36,0 kWh: a diferença vem tanto da energia útil quanto do rendimento um pouco menor.

Erro comum a evitar. Multiplicar 31,0 × 0,90 = 27,9 kWh, invertendo o rendimento, ou repetir os 36,0 kWh do exercício 21.3 sem refazer a conta.

21.10. Piso de 500 Ω/V (Básico)

Enunciado. Alguns recortes de isolamento de REESS usam 500 Ω/V no lugar de 100 Ω/V. Com a leitura de 5,0 MΩ a 400 V do exercício 21.3, o pacote ainda atende? Qual passa a ser a resistência mínima?

Conceito. O critério mais apertado só muda o piso. A resistência específica continua 12 500 Ω/V; compara-se agora com 500 Ω/V, e R_mín = 500 × 400.

Fórmula. `r = R / V_pacote, R_mín = r_mín V_pacote`

De onde vem. É o exercício 21.3 e 21.4 com o piso de 500 Ω/V, um limiar mais exigente que aparece em alguns requisitos de pacote.

Resolução

1. **Critério e mínimo.** r = 12 500 Ω/V, ainda maior do que 500 Ω/V: aprovado, com folga de 12 500 / 500 = 25 vezes. R_mín = 500 × 400 = 200 kΩ.

Resposta. Ainda aprovado: 12 500 Ω/V contra o piso de 500 Ω/V, com folga de 25 vezes. R_mín = 200 kΩ.

Interpretação. Subir o piso de 100 para 500 Ω/V multiplica por cinco a resistência mínima (de 40 kΩ para 200 kΩ), mas os 5,0 MΩ ainda passam folgados. O ensaio só ficaria no limite se a leitura caísse perto de 200 kΩ.

Erro comum a evitar. Achar que 12 500 Ω/V já não atende 500 Ω/V, ou calcular R_mín = 500 Ω, outra vez sem multiplicar pela tensão do pacote.

21.11. Climatização no ciclo de homologação (Intermediário)

Enunciado. O clima de cabine acrescenta 0,50 kWh/100 km ao consumo da bateria do exercício 21.2. Com 31,0 kWh úteis e η_chg = 0,90, qual fica a autonomia e o consumo na rede?

Conceito. O acessório soma-se ao consumo do ciclo. A autonomia e o consumo na rede se refazem com o novo c_bat.

Fórmula. `c_bat' = c_bat + c_clima, A' = 100 E_útil / c_bat'`

De onde vem. É o exercício 21.2 com uma parcela de climatização, no mesmo espírito do acessório de 1 kW já usado na modelagem.

Resolução

1. **Novo consumo e autonomia.** c_bat' = 13,5 + 0,50 = 14,0 kWh/100 km. A' = 100 × 31,0 / 14,0 = 221,4 km, que se declara 221 km. c_rede' = 14,0 / 0,90 = 15,6 kWh/100 km.

Resposta. A' = 221 km (221,4 km), 8,2 km abaixo dos 230 km. Consumo na rede = 15,6 kWh/100 km.

Interpretação. Meio quilowatt-hora extra por 100 km tira 8,2 km da autonomia declarada e sobe a conta da rede de 15,0 para 15,6 kWh/100 km. Se o ciclo oficial for sem clima, o uso real com ar-condicionado fica abaixo do número homologado.

Erro comum a evitar. Somar 0,50 kWh/100 km só na rede, ou subtrair 0,50 km da autonomia de 230 km no lugar de refazer 31,0 / 0,140.

21.12. Consumo 20 % maior no frio (Intermediário)

Enunciado. Num ensaio a baixa temperatura, o consumo da bateria sobe 20 % em relação aos 13,5 kWh/100 km do exercício 21.2. Com 31,0 kWh úteis, qual é a autonomia? Quanto ela cai em relação aos 229,6 km?

Conceito. O consumo escala pelo fator 1,20 e a autonomia cai na razão inversa, 1 / 1,20.

Fórmula. `c_frio = 1,20 c, A_frio = 100 E_útil / c_frio`

De onde vem. É um recorte didático de ensaio a frio, usando o mesmo pacote e o mesmo ciclo do exercício 21.2, só com o consumo inflado.

Resolução

1. **Consumo, autonomia e queda.** c_frio = 1,20 × 13,5 = 16,2 kWh/100 km. A_frio = 100 × 31,0 / 16,2 = 191,4 km. Queda = 229,6 − 191,4 = 38,2 km, ou 16,6 %.

Resposta. A_frio = 191 km (191,4 km), 38,2 km abaixo dos 229,6 km, com 16,2 kWh/100 km.

Interpretação. Vinte por cento a mais de consumo tira 16,6 % da autonomia, não 20 % da distância de um modo linear qualquer: 1 / 1,20 = 0,833, e 229,6 × 0,833 = 191,4 km. É o tipo de queda que o motorista percece no inverno, mesmo com o número de homologação em 230 km.

Erro comum a evitar. Tirar 20 % de 230 km e declarar 184 km, no lugar de dividir a energia pelo consumo inflado.

21.13. Ganho de autonomia com a recuperação no ciclo (Intermediário)

Enunciado. Num recorte ilustrativo, o mesmo ciclo do exercício 21.2, sem recuperação, teria medido 16,0 kWh/100 km na bateria. Com recuperação, mediu 13,5 kWh/100 km. Qual seria a autonomia sem recuperação, com 31,0 kWh úteis, e quantos quilômetros a recuperação acrescenta?

Conceito. A autonomia sem recuperação usa o consumo maior. O ganho é a diferença entre as duas autonomias, no mesmo recorte de energia.

Fórmula. `A_sem = 100 E_útil / c_sem, ganho = A_com − A_sem`

De onde vem. É um contrafactual didático do ensaio 21.2: o 13,5 kWh/100 km já inclui recuperação; o 16,0 kWh/100 km é o que o ciclo mediria se essa parcela fosse desligada.

Resolução

1. **Autonomia e ganho.** A_sem = 100 × 31,0 / 16,0 = 193,8 km. ganho = 229,6 − 193,8 = 35,8 km, cerca de 36 km.

Resposta. Sem recuperação, A = 194 km (193,8 km). A recuperação acrescenta 35,8 km neste ciclo.

Interpretação. Cerca de 36 km, ou 16 % dos 230 km declarados, vêm da recuperação neste recorte. Por isso o ciclo oficial precisa deixar claro se a recuperação está ativa: desligá-la muda o número que vai para o comunicado.

Erro comum a evitar. Subtrair 16,0 − 13,5 = 2,5 km, tratando a diferença de consumo como se já fosse diferença de autonomia.

21.14. Cidade e estrada que se combinam em 13,5 (Intermediário)

Enunciado. Um recorte ilustrativo do ensaio mistura, metade a metade, um trecho urbano de 16,0 kWh/100 km e um trecho rodoviário de 11,0 kWh/100 km. Confirme o consumo misto e calcule as três autonomias com 31,0 kWh úteis.

Conceito. O consumo misto, com o mesmo peso em distância, é a média aritmética dos dois consumos. Cada autonomia usa o seu consumo no mesmo recorte de energia.

Fórmula. `c_misto = (c_urb + c_rod) / 2, A = 100 E_útil / c`

De onde vem. É uma decomposição didática do 13,5 kWh/100 km do exercício 21.2 em dois trechos de pesos iguais.

Resolução

1. **Misto e autonomias.** c_misto = (16,0 + 11,0) / 2 = 13,5 kWh/100 km, o valor do ensaio. A_urb = 100 × 31,0 / 16,0 = 193,8 km. A_rod = 100 × 31,0 / 11,0 = 281,8 km. A_misto = 229,6 km.

Resposta. c_misto = 13,5 kWh/100 km. Autonomias: 193,8 km na cidade, 281,8 km na estrada e 229,6 km no misto.

Interpretação. O 230 km do comunicado é uma média. Quem roda só na cidade, neste recorte, vê cerca de 194 km; quem roda só na estrada, cerca de 282 km. A média das autonomias, (193,8 + 281,8) / 2 = 237,8 km, não é o misto: o correto é inverter o consumo médio.

Erro comum a evitar. Declarar a autonomia mista como a média de 193,8 e 281,8, que daria 237,8 km, no lugar de usar o consumo médio 13,5.

21.15. Consumo na rede com o rendimento 88,9 % (Intermediário)

Enunciado. Recalcule o consumo na rede do exercício 21.2 usando o rendimento 88,9 % medido no exercício 21.3, no lugar de 0,90. O consumo na bateria continua 13,5 kWh/100 km.

Conceito. c_rede = c_bat / η. Um rendimento um pouco menor sobe o consumo que aparece na conta de luz, sem mudar a autonomia, que depende só da bateria.

Fórmula. `c_rede = c_bat / η_chg`

De onde vem. Une os dois ensaios originais: o consumo de 13,5 kWh/100 km e o η = 32,0 / 36,0 = 0,889.

Resolução

1. **Consumo na rede.** η = 32,0 / 36,0 = 0,8889. c_rede = 13,5 / 0,8889 = 15,2 kWh/100 km, 0,2 kWh/100 km acima dos 15,0 do exercício 21.2.

Resposta. c_rede = 15,2 kWh/100 km com η = 88,9 %, dois décimos acima dos 15,0 kWh/100 km do exercício 21.2.

Interpretação. A autonomia de 230 km não muda, porque ela sai da bateria. O que muda é a conta da luz: 15,2 no lugar de 15,0 kWh/100 km. Em 10 000 km, isso são 20 kWh a mais na rede.

Erro comum a evitar. Recalcular também a autonomia com o 88,9 %, como se o rendimento do carregador alterasse a energia já armazenada no pacote.

21.16. Tempo de recarga rápida de 10 % a 80 % (Intermediário)

Enunciado. Uma recarga DC de exemplo entrega 50 kW constantes no pacote, com rendimento 0,95 da rede até a bateria. Para subir de 10 % a 80 % de 32,0 kWh úteis, qual é a energia no pacote, o tempo e a energia na rede?

Conceito. A janela 10–80 % vale 0,70 da energia útil. O tempo, com potência constante no pacote, é essa energia dividida por 50 kW. A energia na rede é a do pacote dividida pelo rendimento.

Fórmula. `E_bat = 0,70 E_útil, t = E_bat / P_pacote, E_rede = E_bat / η`

De onde vem. É o recorte usual de tempo de recarga rápida (10 a 80 %), com a energia de 32,0 kWh e um rendimento um pouco melhor do que o da recarga AC do exercício 21.3.

Resolução

1. **Energia, tempo e rede.** E_bat = 0,70 × 32,0 = 22,4 kWh. t = 22,4 / 50 = 0,448 h = 26,9 min. E_rede = 22,4 / 0,95 = 23,6 kWh.

Resposta. E_bat = 22,4 kWh; t = 26,9 min a 50 kW no pacote; E_rede = 23,6 kWh, com η = 0,95.

Interpretação. Vinte e sete minutos neste modelo é o tempo ‘de folheto’ a potência constante. Na prática a curva cai no fim da janela, e o tempo real é maior. Os 23,6 kWh na rede mostram que a recarga rápida, mesmo mais eficiente (0,95 contra 0,889), ainda cobra um pedágio da tomada.

Erro comum a evitar. Calcular 0,70 × 32,0 / 50 = 0,448 e declarar 0,45 minutos, esquecendo de passar hora para minuto, ou dividir 22,4 kWh por 0,95 como se fosse o tempo.

21.17. Isolamento após umidade (Intermediário)

Enunciado. Depois de um ensaio de umidade, o megôhmetro lê 0,20 MΩ no mesmo pacote de 400 V. Qual é a resistência específica? Ainda atende 100 Ω/V? A que leitura o ensaio reprovaria?

Conceito. A conta é a mesma do exercício 21.3, com a resistência menor. O limite de reprovação é R = 100 Ω/V × 400 V = 40,0 kΩ, ou 0,040 MΩ.

Fórmula. `r = R / V_pacote, R_lim = r_mín V_pacote`

De onde vem. É o isolamento do exercício 21.3 depois de um condicionamento ambiental, quando a leitura costuma cair.

Resolução

1. **Leitura úmida e limite.** r = 0,20×10⁶ / 400 = 500 Ω/V, ainda aprovado no critério 100 Ω/V, com folga de 5 vezes. A reprovação viria abaixo de 40,0 kΩ (0,040 MΩ), que dá 100 Ω/V.

Resposta. r = 500 Ω/V, ainda aprovado no critério 100 Ω/V (folga de 5 vezes). Reprovaria abaixo de 0,040 MΩ.

Interpretação. A leitura caiu de 5,0 MΩ para 0,20 MΩ, 25 vezes menor, e ainda assim passa. O isolamento deste pacote só viraria problema perto de 40 kΩ — três ordens abaixo da leitura seca de 5,0 MΩ.

Erro comum a evitar. Tratar 0,20 MΩ / 400 V como 0,0005 Ω/V, esquecendo os 10^6 do prefixo mega, e reprovar um ensaio que ainda tem 500 Ω/V.

21.18. Tensão de ensaio dielétrico (Intermediário)

Enunciado. Um critério ilustrativo de ensaio dielétrico pede 2 U + 1 000 V, com U a tensão nominal do pacote. Qual é a tensão de ensaio num pacote de 400 V? Se a corrente de fuga máxima for 1,0 mA, qual é a resistência mínima equivalente nesse ensaio?

Conceito. A tensão de ensaio é 2U + 1 000 V. A resistência mínima equivalente é essa tensão dividida pela corrente de fuga máxima admitida.

Fórmula. `U_ensaio = 2 U + 1 000 V, R_mín = U_ensaio / I_fuga`

De onde vem. A regra 2U + 1 000 V é um recorte clássico de ensaio de rigidez dielétrica, usado aqui de forma didática, não como texto oficial de uma norma.

Resolução

1. **Tensão e resistência equivalente.** U_ensaio = 2 × 400 + 1 000 = 1 800 V. R_mín = 1 800 / 0,0010 = 1,80 MΩ.

Resposta. U_ensaio = 1 800 V. R_mín equivalente = 1,80 MΩ, para 1,0 mA de fuga.

Interpretação. Mil e oitocentos volts é bem mais do que os 500 V do megôhmetro do exercício 21.3: o dielétrico estressa o isolante, o megôhmetro mede a resistência em regime. Os 5,0 MΩ secos ainda superam os 1,80 MΩ deste limite de fuga, mas são ensaios diferentes e não se substituem.

Erro comum a evitar. Calcular 2 × 400 = 800 V, esquecendo os 1 000 V, ou usar 1,0 mA sobre 400 V no lugar de 1 800 V.

21.19. Descarga do elo após intertravamento (Intermediário)

Enunciado. O capacitor de 1 000 µF a 400 V do exercício 20.18 deve cair abaixo de 60 V depois da abertura do intertravamento. Com um resistor de descarga de 2,00 kΩ (dado de exemplo), em quanto tempo a tensão atinge 60 V? Cabe folgado num limite de 5,0 s?

Conceito. A tensão do capacitor descarrega em exponencial, V(t) = V_0 e^{−t / (R C)}. O tempo até V_f é t = −R C ln(V_f / V_0).

Fórmula. `t = − R C ln(V_f / V_0)`

De onde vem. UNECE R100 pede que o elo seja levado a um nível seguro depois do intertravamento ou de um evento; 60 V e alguns segundos são o recorte didático usado aqui.

Resolução

1. **Constante de tempo e instante.** τ = R C = 2 000 × 0,0010 = 2,00 ms. t = −2,00 ms × ln(60 / 400) = −2,00 × ln(0,150) = 3,79 ms, muito abaixo de 5,0 s.

Resposta. t = 3,79 ms até 60 V, muito abaixo do limite ilustrativo de 5,0 s.

Interpretação. Dois milissegundos de constante de tempo descarregam o elo em menos de quatro milissegundos. O limite de 5 s, neste recorte, é folgado por três ordens de grandeza: o que importa é o resistor estar de fato no circuito depois do intertravamento.

Erro comum a evitar. Usar t = R C = 2,0 ms, parando na constante de tempo, ou calcular ln(400 / 60) com o sinal trocado e obter um tempo negativo.

21.20. Janela útil de 31,0 kWh nos 32,0 kWh (Intermediário)

Enunciado. O ensaio 21.2 usa 31,0 kWh úteis e a modelagem usa 32,0 kWh. Que fração da energia de modelagem entra no comunicado de autonomia? De quanto é a reserva, e como ela se traduz nos 230 km contra os 237 km do exercício 21.5?

Conceito. A fração é 31,0 / 32,0. A reserva é o complemento. A autonomia de ensaio é a de 32,0 kWh vezes essa mesma fração, no mesmo consumo.

Fórmula. `f = E_ensaio / E_mod, A_ensaio = f A_mod`

De onde vem. Fecha os exercícios 21.2 e 21.5: a diferença de 7 km é só a janela de energia, não um consumo diferente.

Resolução

1. **Fração, reserva e autonomias.** f = 31,0 / 32,0 = 0,9688 = 96,9 %. Reserva = 1,0 kWh, ou 3,1 %. A_ensaio = 0,9688 × 237,0 = 229,6 km, que se declara 230 km.

Resposta. f = 96,9 % (31,0 / 32,0). Reserva = 1,0 kWh (3,1 %). Isso reduz 237,0 km para 229,6 km, declarados 230 km.

Interpretação. Um quilowatt-hora retido, 3,1 % do pacote, tira 7 km do comunicado. Não é perda no ciclo: é a escolha da janela útil. Por isso os 32,0 kWh da modelagem e os 31,0 kWh do ensaio não devem ser misturados no mesmo número de autonomia.

Erro comum a evitar. Atribuir os 7 km a um consumo diferente, ou calcular a reserva como 32,0 − 31,0 = 1,0 km, trocando quilowatt-hora por quilômetro.

21.21. Margem ilustrativa de emissão conduzida (Desafio)

Enunciado. Num ponto de um ensaio ilustrativo de EMC, o limite de emissão conduzida é 60 dBµV e a medição lê 47 dBµV. Qual é a margem? O ponto passa?

Conceito. A margem em dB é o limite menos a medição, porque o decibel já está em escala logarítmica. Margem positiva significa ensaio aprovado naquele ponto.

Fórmula. `margem = L_lim − L_med`

De onde vem. É um recorte didático de UNECE R10: um único ponto de emissão conduzida, para numericizar a ideia de margem, não o relatório completo do ensaio.

Resolução

1. **Margem.** margem = 60 − 47 = 13 dB, positiva: o ponto passa.

Resposta. Margem = 13 dB, positiva: o ponto passa neste recorte ilustrativo.

Interpretação. Treze decibéis de folga neste ponto são confortáveis, mas um ensaio de R10 tem muitos pontos e dois sentidos (emissão e imunidade). Um único número não homologa o carro; só ilustra o que é ‘passar com margem’.

Erro comum a evitar. Dividir 60 / 47 = 1,28 e declarar 28 % de margem, misturando razão linear com uma grandeza já em decibel, ou reprovar porque 47 não é igual a 60.

21.22. Ensaio 13,5 contra a modelagem 16,37 (Desafio)

Enunciado. A modelagem do exercício 19.1, em 100 km sem recuperação, pediu 16,37 kWh na bateria. O ensaio 21.2 mediu 13,5 kWh/100 km. Quanto o ciclo de homologação consome a menos, em kWh/100 km e em percentual? Com 31,0 kWh úteis, quais seriam as duas autonomias?

Conceito. A diferença absoluta é 16,37 − 13,5. O percentual é essa diferença sobre 16,37. Cada autonomia usa o seu consumo no mesmo recorte de 31,0 kWh.

Fórmula. `Δc = c_mod − c_ens, A = 100 E_útil / c`

De onde vem. Compara o ensaio de homologação com o ciclo urbano sem recuperação da modelagem, para ver por que os números das duas disciplinas não coincidem.

Resolução

1. **Diferença e autonomias.** Δc = 16,37 − 13,5 = 2,87 kWh/100 km, ou 2,87 / 16,37 = 17,5 % a menos no ensaio. A_ens = 229,6 km. A_mod = 100 × 31,0 / 16,37 = 189,4 km.

Resposta. O ensaio consome 2,87 kWh/100 km a menos (17,5 %). Autonomias, com 31,0 kWh: 229,6 km no ensaio e 189,4 km com o consumo da modelagem.

Interpretação. Os 17,5 % de diferença não são erro de conta: a modelagem 19.1 é um urbano sem recuperação, e o ensaio mistura trechos e inclui recuperação (exercícios 21.13 e 21.14). Misturar 16,37 kWh/100 km com os 230 km do comunicado seria comparar ciclos diferentes.

Erro comum a evitar. Dividir 13,5 / 16,37 e declarar que o ensaio consome 82,5 % a menos, trocando a razão pelo percentual da diferença.

21.23. Incerteza de 3 % no consumo medido (Desafio)

Enunciado. O consumo de 13,5 kWh/100 km do exercício 21.2 tem incerteza ilustrativa de ± 3 %. Qual é a faixa de autonomia com 31,0 kWh úteis? O valor declarado de 230 km cabe nessa faixa?

Conceito. O consumo vai a 13,5 × 1,03 e 13,5 × 0,97. A autonomia, que é inversa do consumo, vai a A / 1,03 e A / 0,97, com A = 229,6 km.

Fórmula. `A_mín = 100 E / (c × 1,03), A_máx = 100 E / (c × 0,97)`

De onde vem. É um recorte didático de incerteza de medição no ensaio de consumo, aplicado à autonomia declarada.

Resolução

1. **Faixa.** A_mín = 229,6 / 1,03 = 222,9 km. A_máx = 229,6 / 0,97 = 236,7 km. Os 230 km declarados cabem no intervalo 222,9 a 236,7 km.

Resposta. Faixa de 222,9 km a 236,7 km. Os 230 km declarados cabem nessa faixa.

Interpretação. Três por cento no consumo abrem quase 14 km de faixa em torno de 229,6 km. Declarar 230 km, arredondado, é coerente com o centro da medição; já não seria honesto declarar 237 km (exercício 21.5) a partir deste ensaio de 31,0 kWh.

Erro comum a evitar. Aplicar ± 3 % sobre 230 km (223 a 237 km) no lugar de inverter o consumo, o que quase coincide aqui mas não é o método certo quando a incerteza é do consumo.

21.24. Energia anual na rede a 15 000 km (Desafio)

Enunciado. Um uso anual ilustrativo de 15 000 km, com o consumo na rede de 15,0 kWh/100 km do exercício 21.2, pede quanta energia da tomada no ano? E por mês, se o uso for uniforme?

Conceito. A energia anual é o consumo da rede vezes a distância, em unidades de 100 km. O mensal, em uso uniforme, divide o anual por 12.

Fórmula. `E_ano = c_rede (D / 100), E_mês = E_ano / 12`

De onde vem. Leva o consumo homologado na rede para um recorte anual de uso, o número que o dono compara com a conta de luz.

Resolução

1. **Ano e mês.** E_ano = 15,0 × (15 000 / 100) = 2 250 kWh/ano. E_mês = 2 250 / 12 = 187,5 kWh/mês.

Resposta. E_ano = 2 250 kWh/ano; E_mês = 187,5 kWh/mês, a 15 000 km e 15,0 kWh/100 km na rede.

Interpretação. Dois mil e duzentos e cinquenta quilowatts-hora por ano é o pedido da tomada neste recorte. Se o dono rodar no consumo da bateria (13,5) e esquecer o carregador, subestimaria a conta em 10 % — 225 kWh no ano.

Erro comum a evitar. Multiplicar 15,0 × 15 000 = 225 000 kWh, esquecendo que o consumo já está em base de 100 km, ou usar 13,5 kWh/100 km como se fosse o da rede.

21.25. Misto 45 / 55 com dois consumos (Desafio)

Enunciado. Outro recorte ilustrativo pesa 45 % da distância em cidade, a 18,0 kWh/100 km, e 55 % em estrada, a 11,0 kWh/100 km. Qual é o consumo misto, a autonomia com 31,0 kWh úteis e o consumo na rede com η_chg = 0,90?

Conceito. Com pesos em distância, o consumo misto é a média ponderada. A autonomia e o consumo na rede usam esse misto.

Fórmula. `c_misto = w_urb c_urb + w_rod c_rod, A = 100 E_útil / c_misto`

De onde vem. É uma ponderação tipo 45/55, diferente da metade a metade do exercício 21.14, para mostrar que o peso do trecho muda o comunicado.

Resolução

1. **Misto, autonomia e rede.** c_misto = 0,45 × 18,0 + 0,55 × 11,0 = 8,10 + 6,05 = 14,15 kWh/100 km. A = 100 × 31,0 / 14,15 = 219,1 km, que se declara 219 km. c_rede = 14,15 / 0,90 = 15,7 kWh/100 km.

Resposta. c_misto = 14,15 kWh/100 km; A = 219 km (219,1 km); c_rede = 15,7 kWh/100 km.

Interpretação. Trocar o 50/50 do exercício 21.14 por 45/55, e o urbano de 16,0 para 18,0, derruba a autonomia de 230 km para 219 km e sobe a rede de 15,0 para 15,7 kWh/100 km. O comunicado herda o peso e o consumo de cada trecho, não só a energia do pacote.

Erro comum a evitar. Fazer a média simples (18,0 + 11,0) / 2 = 14,5 kWh/100 km, ignorando os pesos 45/55, ou média das autonomias no lugar do consumo ponderado.

21.26. Isolamento de um pacote de 800 V (Desafio)

Enunciado. A mesma leitura de 5,0 MΩ do exercício 21.3 é feita num pacote de 800 V. Qual é a resistência específica e a folga no critério 100 Ω/V? Qual seria a resistência mínima?

Conceito. r cai quando a tensão sobe, com a mesma resistência lida. O piso de 100 Ω/V continua o mesmo, então a folga diminui e R_mín sobe.

Fórmula. `r = R / V_pacote, R_mín = 100 V_pacote`

De onde vem. É o ensaio 21.3 levado a um sistema de 800 V, para ver como o critério específico aperta em alta tensão.

Resolução

1. **Específico, folga e mínimo.** r = 5,0×10⁶ / 800 = 6 250 Ω/V, ainda aprovado: folga = 6 250 / 100 = 62,5 vezes. R_mín = 100 × 800 = 80,0 kΩ.

Resposta. r = 6 250 Ω/V, aprovado, com folga de 62,5 vezes. R_mín = 80,0 kΩ.

Interpretação. A 800 V a folga cai à metade da de 400 V (62,5 contra 125), e o mínimo sobe de 40 kΩ para 80 kΩ. Os 5,0 MΩ ainda passam, mas um sistema de 800 V exige mais do isolante para manter a mesma folga específica.

Erro comum a evitar. Repetir 12 500 Ω/V, como se a tensão do pacote não entrasse no denominador, ou reprovar 6 250 Ω/V por compará-lo com 12 500 no lugar do piso de 100.

21.27. Rendimento de recarga com carga de 12 V (Desafio)

Enunciado. Durante a recarga do exercício 21.3, além dos 32,0 kWh no pacote, o conversor de 12 V consome 0,40 kWh e a rede continua em 36,0 kWh. Qual é o rendimento só do pacote e o rendimento que inclui essa carga auxiliar?

Conceito. O rendimento do pacote é E_bat / E_rede. O rendimento do veículo na recarga soma a energia útil do auxiliar no numerador, quando ela também sai da tomada.

Fórmula. `η_pacote = E_bat / E_rede, η_veíc = (E_bat + E_aux) / E_rede`

De onde vem. É o balanço 21.3 com uma parcela explícita de 12 V, para não tratar toda a diferença 36,0 − 32,0 como perda do carregador.

Resolução

1. **Dois rendimentos.** η_pacote = 32,0 / 36,0 = 88,9 %. η_veíc = (32,0 + 0,40) / 36,0 = 32,4 / 36,0 = 90,0 %. Dos 4,0 kWh que não entraram no pacote, 0,40 kWh foram ao auxiliar e 3,60 kWh são perda.

Resposta. η_pacote = 88,9 %; η_veíc = 90,0 %, com 0,40 kWh no auxiliar e 3,60 kWh de perda.

Interpretação. Os 88,9 % do exercício 21.3 tratam os 4,0 kWh como se fossem só perda. Quando 0,40 kWh vão ao 12 V, o pedágio verdadeiro do carregador é 3,60 kWh e o rendimento do veículo na recarga sobe a 90,0 %. O comunicado precisa dizer o que entra no numerador.

Erro comum a evitar. Somar 0,40 kWh aos 36,0 kWh da rede, no lugar do numerador, ou declarar 90,0 % como se já fosse o η_pacote do ensaio original.

21.28. Acessório de 1 kW no ciclo de homologação (Desafio)

Enunciado. Um acessório de 1,00 kW (clima ou outros) opera o tempo todo a 40 km/h médios, no recorte do exercício 21.2. Quanto isso acrescenta ao consumo da bateria? Qual fica a autonomia com 31,0 kWh úteis?

Conceito. A parcela do acessório, em kWh/100 km, é 100 P_aux / v, com P em kW e v em km/h. Soma-se ao 13,5 kWh/100 km e refaz-se a autonomia.

Fórmula. `c_aux = 100 P_aux / v, A' = 100 E_útil / (c_bat + c_aux)`

De onde vem. É o mesmo 1 kW da modelagem 19.14, agora convertido para o ciclo de homologação a 40 km/h médios.

Resolução

1. **Parcela, consumo e autonomia.** c_aux = 100 × 1,00 / 40 = 2,50 kWh/100 km. c' = 13,5 + 2,50 = 16,0 kWh/100 km. A' = 100 × 31,0 / 16,0 = 193,8 km, 35,8 km abaixo dos 229,6 km.

Resposta. c_aux = 2,50 kWh/100 km; c' = 16,0 kWh/100 km; A' = 193,8 km, 35,8 km abaixo dos 229,6 km.

Interpretação. Um quilowatt contínuo a 40 km/h é pesado: 2,50 kWh/100 km, quase 19 % do ciclo, e a autonomia cai para o mesmo 194 km do exercício 21.13 sem recuperação. A 100 km/h, a parcela cairia para 1,00 kWh/100 km, porque o mesmo acessório se dilui em mais distância por hora.

Erro comum a evitar. Somar 1,00 kWh/100 km, esquecendo o fator 100 / v, ou subtrair 1 km dos 230 km como se 1 kW valesse 1 km.

21.29. Três critérios no mesmo recorte (Desafio)

Enunciado. Neste recorte ilustrativo, o veículo traz isolamento 12 500 Ω/V, rendimento de recarga 88,9 % e autonomia 230 km. Os pisos de exemplo são 100 Ω/V, 85 % e 200 km. Quais critérios passam?

Conceito. Cada grandeza se compara ao seu piso. O recorte só está aprovado neste exercício se os três critérios passarem ao mesmo tempo.

Fórmula. `aprovado se r ≥ r_mín, η ≥ η_mín e A ≥ A_mín`

De onde vem. Reúne os três números originais da disciplina num parecer conjunto, com pisos didáticos, não com os limites oficiais de uma norma.

Resolução

1. **Os três pareceres.** Isolamento: 12 500 ≥ 100, passa. Recarga: 88,9 % ≥ 85 %, passa. Autonomia: 230 ≥ 200, passa. Neste recorte, os três critérios passam.

Resposta. Os três passam neste recorte: 12 500 Ω/V ≥ 100 Ω/V, 88,9 % ≥ 85 % e 230 km ≥ 200 km.

Interpretação. Com estes pisos de exemplo o up! ilustrativo passa folgado no isolamento, passa perto no rendimento (3,9 pontos de margem) e passa com 30 km de folga na autonomia. Se o piso de recarga subisse para 90 %, o 88,9 % reprovaria, mesmo com isolamento e autonomia aprovados.

Erro comum a evitar. Aprovar o conjunto só porque o isolamento tem folga enorme, ou comparar 88,9 % com 100 Ω/V, misturando as unidades dos três critérios.

21.30. Síntese: do rito ao comunicado (Desafio)

Enunciado. Reúna os três resultados originais desta disciplina e o que eles significam no up! ilustrativo: as quatro frentes além dos ensaios de carro; autonomia 230 km e 15,0 kWh/100 km na rede; isolamento 12 500 Ω/V e rendimento de recarga 88,9 %. Os 230 km são compatíveis com os 32,0 kWh da modelagem?

Conceito. Os três números já foram calculados. A compatibilidade com 32,0 kWh é o exercício 21.5: no mesmo consumo, a autonomia seria 237 km, não 230 km, porque o ensaio usou 31,0 kWh.

Fórmula. `A = 100 E_útil / c_bat, c_rede = c_bat / η_chg, r = R / V_pacote`

De onde vem. É o fecho da disciplina e do módulo 3: o rito, o comunicado de consumo e o ensaio de isolamento, ligados à energia já usada na modelagem.

Resolução

1. **Os três blocos.** Frentes: R100, R10, consumo/autonomia/recarga e rito local. Comunicado: 230 km (229,6 km) e 15,0 kWh/100 km na rede, de 31,0 kWh e 13,5 kWh/100 km com η = 0,90. Isolamento e recarga: 12 500 Ω/V, aprovado, e η = 88,9 %.
2. **Compatibilidade com 32,0 kWh.** No mesmo ciclo, 32,0 kWh dariam 237 km (exercício 21.5). Os 230 km do comunicado não devem ser misturados aos 32,0 kWh da modelagem.

Resposta. Quatro frentes além dos ensaios de carro (R100, R10, consumo/recarga, rito local); autonomia 230 km e 15,0 kWh/100 km na rede; isolamento 12 500 Ω/V e recarga 88,9 %. Os 230 km vêm de 31,0 kWh, não dos 32,0 kWh da modelagem, que dariam 237 km no mesmo ciclo.

Interpretação. Esta disciplina fecha o módulo 3 assim: o rito acrescenta segurança elétrica, EMC, consumo e o caminho local; o comunicado de 230 km e 15,0 kWh/100 km na rede é o que o dono vê; o isolamento passa folgado e a recarga, a 88,9 %, explica a diferença entre a tomada e o pacote. O próximo passo, fora desta lista, é conferir o texto vigente de cada norma, porque estes números são didáticos.

Erro comum a evitar. Declarar 230 km a partir de 32,0 kWh, ou tratar os 15,0 kWh/100 km como consumo da bateria, invertendo o papel da rede e do pacote.
