CAPÍTOL 1

El transport ferroviari

El transport ferroviari és un dels transports més sostenibles dels que existeixen. El fet que funcioni amb energia elèctrica fa que tingiui dos avantatges. Primerament l'eficiència dels motors elèctrics és significativament superior a la dels motors de combustió . En segon lloc, els motors elèctrics tenen la possibilitat de funcionar a la inversa com generadors, cosa que els permet en certes ocasions recuperar part de l'energia cinètica i guardar-la en energia elèctrica. Per contra, el seu elevat pes fa que la quantitat de passatgers que ha de transportar hagi de superar un límit determinat per arribar a l'eficiència òptima. En aquest capítol estudiarem la física relacionada amb el transport a través de línies fèrrees, estudiant diferents tipus de transport, el tren de rodalies, el tren d'alta velocitat i el tranvia.

1.1 El tren de rodalies

Els trens de rodalies estan pensats per distribuir molts passatgers en les proximitats de grans ciutats. L'elevat nombre de parades que han de realitzar fa que tiguin una velocitat mitjana molt menor que la que podria tenir si tan sols es desplacés des d'un punt a un altre sense parades intermitges.

Tal i com s'estudia en el capítol dedicat a l'automoció, hi ha dos principals resistències que hem de vèncer quan ens movem a velocitats moderades. Primerament existeix la inèrcia. Aquest terme prové de la resistència d'un objecte a modificar la seva velocitat. Com diu la primera llei de Newton, un cos necessita l'acció d'una força si vol modificar la velocitat a la que va. La segona llei concreta més i diu que la força F ha de valer exactament

$$F = ma \tag{1.1}$$

on m és la massa de l'objecte i a és l'acceleració que el cos experimenta.

Una segona resistència és la que imposa la fricció amb l'aire. En el cas d'un objecte aproximadament esfèric amb una àrea transversal A aquesta valdria $(1/2)\rho CAv^2$, on ρ és la densitat de l'aire, v és la velocitat a la que ens movem i C és un coeficient de fricció que per a un vehicle standar val aproximadament 0.3. La gran longitud fa que haguem de recórrer a alguna modificació d'aquesta llei per tal de fer aparèixer la seva longitud a part de la seva secció transversal. A efectes pràctics, la fricció que afegeixen les parets laterals d'un tren estàndar fan que el coeficient de fricció passi d'un valor de 0.3 a 1-1.4, depenent de si estem estudiant un tren de rodalies o un d'alta velocitat.

El primer estudi que podem fer és el de veure quant valen els dos termes en les condicions habituals de funcionament. Per tal de fer els càluls utilitzarem un tren de rodalies Civia amb les dades tècniques que apareixen a la Taula **??**.

Magnitud	Variable	Valor
Amplada	W	2.94 m
Alçada	H	4.26 m
Longitud	L	98 m
Massa	m	150 t
Acceleració de servei	a	1 m/s^2
Velocitat màxima	v_m	120 km/h
Potència nominal	P	2200 KW

Taula 1.1: Dades tècniques d'un tren tipus Civia de 5 mòduls

Suposem que aquest tren de rodalies, partint del repòs, comença a accelerar-se per tal d'anar a l'estació següent. La força que necessita fer per tal de tenir l'acceleració de servei és

$$F_a = ma = 1.5 \cdot 10^5 \cdot 1 = 1.5 \cdot 10^5 \text{ N}. \tag{1.2}$$

Aquesta acceleració es mantindrà fins que el tren aconsegueix arribar a la velocitat màxima durant un temps

$$\Delta t = \frac{\Delta v}{a} = \frac{33.3 - 0}{1} = 33.3 \text{ s}. \tag{1.3}$$

La distància que necessita per aconseguir aquesta velocitat la podem trobar a partir de les lleis de la cinemàtica del MRUA,

$$\Delta x = \frac{v_m^2}{2a} = \frac{33.3^2}{2 \cdot 1} = 555 \text{ m}. \tag{1.4}$$

Com podem veure, és una distància força gran. La distància típica entre dues estacions de rodalies és d'entre 2 a 5 km, de forma que podem dir que un tren de rodalies es passa una bona part del trajecte accelerant.

Un cop sabem la força que fa el tren per accelerar-se, calcularem quanta n'ha de fer anant a la velocitat màxima per vèncer la força de fricció

$$F_f = \frac{1}{2}\rho C A v = \frac{1}{2} \cdot 1.2 \cdot 1 \cdot (2.94 \cdot 4.26) \cdot 33.3^2 = 8.332 \cdot 10^3 \text{ N}, \qquad (1.5)$$

on hem utilitzat com a dades la densitat de l'aire $\rho = 1.2$ kg/m^3, un coeficient aerodinàmic típic d'un tren $C = 1$, i finalment $A = W \cdot H$ tot utilitzant les dades de la taula **??** per a mesurar l'àrea.

Observem la gran diferència entre la força que es necessita per posar en moviment el tren i la que es necessita per mantenir-lo en moviment sota l'acció de les forces de fricció. La màquina necessita tan sols $1.5 \cdot 10^5 / 8.33 \cdot 10^3 = 0.055 = 5.5\%$ de la seva potència per vèncer la fricció.

Energia

El fet que la força per accelerar sigui molt major que la necessària per vèncer la fricció no significa que gasti molta més energia en un procés o l'altre. Hem de multiplicar la força per la distància per tal d'obtenir l'energia destinada a un terme o a l'altre. Per a fer els càlculs Ssuposarem que fem un trajecte d'uns 5 km entre dues estacions dels quals ens passem 555 m accelerant. L'energia dissipada en accelerar actuarà en aquests metres, però per vèncer la fricció a l'aire el tren ha de fer força durant tot el viatge.

$$W_a = F_a \cdot \Delta x = 1.5 \cdot 10^5 \cdot 555 = 8.33 \cdot 10^7 \text{ J} \qquad (1.6)$$

$$W_f = F_f \cdot \Delta x = 8.33 \cdot 10^3 \cdot 5000 = 4.16 \cdot 10^7 \text{ J} \qquad (1.7)$$

Aquestes dues energies són molt diferents si pensem en termes d'estalvi. La primera ha estat destinada a posar el tren en moviment. A la pràctica aquesta està enmagatzemada en forma d'energia cinètica i una gran part d'aquesta pot ser recuperada en forma d'energia elèctrica. La segona s'ha perdut completament en forma de moviment de la massa d'aire circundant i no es pot recuperar en absolut.

Quan el tren arriba a l'estació ha de frenar. Antigament els frens eren simples sistemes de fricció que el que feien era transformar l'energia cinètica del tren en energia tèrmica del mecanisme de frenada. Aquests són els anomenats frens reostàtics. Una forma més intel·ligent de frenar seria el de guardar aquesta energia cinètica en una altra forma menys degenerada d'energia, com per exemple l'energia elèctrica. Aquesta és la funció dels frens anomenats dinàmics.

Potència

Una de les limitacions més importants pel que fa al transport prové de la potència desenvolupada. La força i l'energia no ens poden donar una idea de la dificultat que implica moure un objecte. Dit d'altra forma, amb una força menor podem arribar a desplaçar-nos la mateixa distància però amb més temps. Com que una de les finalitats del transport és la de reduir el temps de desplaçament, necessitem parlar de potència a l'hora de parlar d'un vehicle ja que és aquesta en última instància que en determina la velocitat màxima. En el cas calculat en l'anterior apartat, la potència mitjana del tren quan està accelerant

$$P_a = \frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{8.33 \cdot 10^7}{33.3} = 2.5 \cdot 10^6 \text{ W} = 2500 \text{ kW}, \tag{1.8}$$

mentre que quan tan sols està vencent la força de fricció podem utilitzar l'expressió

$$P_f = Fv = 8.332 \cdot 10^3 \cdot 33.3 = 2.77 \cdot 10^5 \text{ W} = 277 \text{ kW}. \tag{1.9}$$

Observem altre cop com el tren funciona al límit de potència quan s'està accelerant, mentre que quan va a velocitat constant, el motor funciona al 10% d'aquesta potència.

En el primer cas hem fet servir l'expressió $\Delta E/\Delta t$ perquè en el tram accelerat la velocitat no és constant, mentre que quan estem considerant la fricció, com que aquesta si que ho és, podem fer servir Fv.

1.2 AVE

Els trens d'alta velocitat tenen unes necessitats energètiques força diferents que les dels trens de rodalies. Gran part de l'energia que gasten es destina a véncer la fricció amb l'aire. Els termes inercials tenen força menys importància pel que fa a la despesa energètica.

Així doncs, en aquest cas començarem a calcular la despesa pel terme de fricció amb l'aire. La màxima velocitat a la que pot anar un AVE és d'entre 300 i 350 km/h. Per als nostres càlculs utilitzarem 325 km/h. La força de fricció que ha de véncer el tren és de

$$F_a = \frac{1}{2}\rho C A v^2 = \frac{1}{2} 1.21(2.95 \cdot 3.89) 90.28^2 = 5.61 \cdot 10^4 \text{ N} \tag{1.10}$$

La potència que necessita per vèncer aquesta força de fricció és de

$$P = Fv = 5.61 \cdot 10^4 \cdot 90.28 = 5.1 \cdot 10^6 \text{ W} = 5.1 \text{ MW}. \tag{1.11}$$

Així doncs, per vèncer la força de fricció, és necessari una potència molt més elevada que en el cas dels vehicles urbans.

Abans d'aconseguir arribar a la velocitat punta, el tren ha hagut d'accelerar. Si la màxima potència que pot desenvolupar el tren és la que té a màxima velocitat (cosa raonable de pensar en aquest cas pequè es tracta d'un tren dissenyat per anar el més ràpid possible), el temps que trigaria en aconseguir la velocitat màxima partint del repòs i sense considerar els efectes de fricció seria

$$t = \frac{E}{P} = \frac{\frac{1}{2}mv^2}{P} = \frac{\frac{1}{2} \cdot 4.25 \cdot 10^5 \cdot 90.28^2}{5.1 \cdot 10^6} = 340 \text{ s} = 5.6 \text{ min}, \tag{1.12}$$

on hem dividit l'energia cinètica que té el tren per la potència de la línia. Això correspòn molt bé amb la realitat d'un tren d'alta velocitat, que necessita de l'ordre de cinc minuts per aconseguir la velocitat de creuer.

Hem simplificat al màxim els càlculs en les últimes seccions i en el capítol anterior per poder demostrar que la simplicitat dels càlculs no està ni de bon tros renyida amb la correcta interpretació dels resultats. Podem dir que els resultats no són exactes, però no podem dir pas que les conclusions que hem tret siguin errònies. Per tal d'orientar aquell que volgués refinar una mica més el model, l'equació de Newton hauria de considerar en tot moment els termes d'acceleració i de fricció

$$F_m - \frac{1}{2}\rho C A v^2 = ma. \tag{1.13}$$

Com que l'acceleració és la derivada de la velocitat, aquesta última equació esdevé una equació diferencial

$$dt = \frac{m}{F_m - \frac{1}{2}\rho C A v^2} dv. \tag{1.14}$$

Equació que s'hauria d'integrar per obtenir $v(t)$. Aquesta però, dependrà que tinguem una hipòtesi de com actual la força en funció de la velocitat. Hom podria pensar que una forma seria suposar que la força F_m és constant al llarg del trajecte, però això no és en absolut cert, com hem demostrat al comparar la força que necessita per accelerar i la que necessita per vèncer la fricció. A més, a través de la solució no podem veure quina fracció de la força es destina a accelerar i quina a vèncer la fricció, havent d'anar a les equacions que hem utilitzat anteriorment per respondre aquesta pregunta. Tot això ens porta a concloure que, tot i millorar en la precisió matemàtica, aquesta última expressió ens ha impedit fer un càlcul més útil.

Tot això no ens ha de portar a creure que la complexitat matematica no sigui desitjable sinó ha de demostrar-nos com, a vegades, la simplicitat ens ajuda a entendre millor la realitat que la complexitat tot i que la precisió que aconseguim sigui, obviament, menor.

1.3 La catenària

Hem vist com la potència dissipada en un tren d'alta velocitat és un ordre de magnitud superior a la dels trens de rodalies per vèncer la fricció amb l'aire. Això fa que les electrificacions de les línies d'alta velocitat hàgin de ser diferents de les necessàries en el cas dels rodalies. La potència en els trens es subministra a través de la catenària. Les línies fèrrees es divideixen en trams d'uns 30 km als quals dóna energia una subestació elèctrica. Cada tram és alimentat únicament per una d'aquestes subestacions, existint entre cada tram una zona de transició en la que la catenària queda sense electrificar. A aquestes zones se les anomena zones neutres. No esdevé cap problema tenir zones no electrificades per a la circulació dels vehicles perquè els vehicles tenen una inèrcia prou gran com per poder passar d'un tram a l'altre sense problemes.

Per fer-nos una idea de les magnituds relacionades amb el subministrament, veiem un cas en concret. En la figura **??** podem veure un esquema de funcionament simplificat de l'alimentació d'un tren. La subestació treballa a una diferència de potencial ΔV respecte al terra. Quan la màquina està funcionant, aquesta es pot entendre com una resistència que enllaça la catenària amb el terra, tancant el circuit. La resistència total del sistema és $R_c + R_t$ on R_c és la resistència del tram de catenària i R_t és la resistència que ofereix el motor del tren. Amb el circuit tancat la intensitat que hi circula és

$$I = \frac{\Delta V}{R_c + R_t}. \tag{1.15}$$

Per tal de poder moure el tren a la velocitat requerida, la condició que hem d'imposar és que es mantingui la potència, ja que aquesta és la que regula la velocitat a la que pot circular el tren. En el cas del tren, la potència P demandada depèn de la intensitat que circula pel circuit

$$P_t = \Delta V I = R_t I^2 = \frac{R_t}{(R_t + R_c)^2} \Delta V^2, \tag{1.16}$$

on en l'última igualtat l'hem escrit per expressar el resultat en funció del voltatge de treball.

El mateix corrent que circula per la màquina ha de circular també per la catenària, però en aquest cas, com que la resistència és menor, la potència dissipada en aquest tram és significativament menor.

$$P_c = \Delta V I = R_c I^2 = \frac{R_c}{(R_t + R_c)^2} \Delta V^2. \tag{1.17}$$

Així doncs, per aconseguir una potència P_t en la màquina, la subestació ha de generar una potència total $P_{tot} = P_c + P_t$.

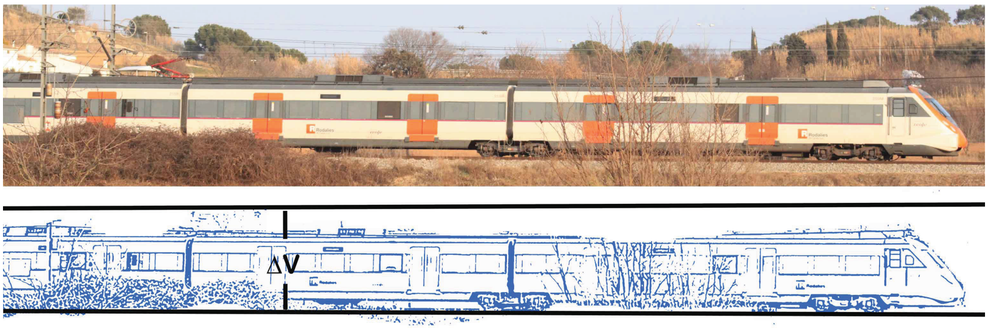

Figura 1.1: Esquema del circuit elèctric d'un tren

Si tot aquest muntatge el posem a un voltatge petit, la màquina ha d'imposar una resistència petita per fer passar prou intensitat per tal d'aconseguir la potència requerida. Si la diferència de potencial és elevada, la màquina podrà aconseguir la mateixa potència amb una resistència més elevada. Això fa que per a una mateixa potència, els alts voltatges siguin sempre més eficients que els baixos voltatges.

Per fer-ho en xifres, calculem per a un tren que dissipa 1 MW de potència, quines són aproximadament les resistències i potències dissipades en el cas dels dos voltatges usats en la xarxa fèrrea catalana (25000 V (a) i 3000 V (b)). Per simplificar el problema, suposarem que tota la caiguda de potencial es dona a la màquina. Per fer-ho correctament hauriem de solucionar un sistema de segon grau.

En cada cas, la intensitat que ha de circular per la màquina per generar una potència de 10^6 W és de

$$I_a = \frac{P}{\Delta V_a} = \frac{10^6}{25000} = 40 \text{ A} \quad I_b = \frac{P}{\Delta V_a} = \frac{10^6}{3000} = 333 \text{ A} \tag{1.18}$$

La resistència que ha d'imposar la màquina per aconseguir aquestes intensitats és, seguint la llei d'Ohm

$$R_a = \frac{\Delta V_a}{I_a} = \frac{25000}{40} = 625\ \Omega R_b = \frac{\Delta V_b}{I_b} = \frac{3000}{333} = 9\ \Omega \tag{1.19}$$

Si ambdós casos circulen per una catenària de les mateixes característiques, hem de calcular primerament quina resistència imposa aquesta sobre el circuit. Calculem el cas d'una catenària d'uns 50 mm^2 de secció i una distància a la subestació elèctrica de 10 km. La resistència la podem obtenir a partir d'aquestes característiques i la resistivitat del coure ($\rho = 16 \cdot 10^{-9}\Omega m$),

$$R_c = \frac{\rho L}{A} = \frac{16 \cdot 10^{-9} 10^4}{50 \cdot 10^{-6}} = 3.2\ \Omega. \tag{1.20}$$

Veiem, doncs, que en el primer cas la resistència de la catenària és menyspreable a la de la màquina, mentre que en el segon cas resulta del mateix ordre. La potència dissipada en la catenària en cada cas és

$$P_{ca} = RI^2 = 3.2{\cdot}40^2 = 5120\,\mathrm{W} P_{cb} = RI^2 = 3.2{\cdot}333^2 = 3.55{\cdot}10^5\,\mathrm{W}. \quad (1.21)$$

El primer cas significa un 0.512% de la potència total, mentre que el segon representa un 35.5%, comprovant així la millora significativa en l'eficiència energètica en el cas de l'alta tensió. Aquesta última xifra és la que porta a aquesta elecció en el cas de trens d'alta velocitat.

1.4 El KERS, els trens i els tramvies

Com hem vist, l'energia cinètica que té un tren és elevadíssima. Aquest fet fa que resulti molt interessant poder recuperar aquesta energia en el moment de frenat per tal de poder-la reutilitzar en una posterior accelerada.

Hi ha dos tipus principals de frens, els reostàtics i els dinàmics. Els primers senzillament transformen l'energia cinètica en energia tèrmica a través de la fricció que imposen sobre les rodes. Els segons transformen part de l'energia cinètica en energia elèctrica tot fent que el motor del vehicle funcioni a la inversa, o sigui, com a generador de corrent.

Un motor elèctric funciona tot aplicant un corrent altern sobre una bobina que disposa d'un imant en el seu centre. El flux magnètic variable sobre l'espira li confereix a aquesta un moviment de rotació capaç de moure un objecte. En el cas dels trens, l'objecte que es mou acaba essent l'eix de les rodes de tracció. Així doncs, amb el motor estem transformant l'energia elèctrica en energia mecànica. Funcionant a la inversa, movent l'eix es pot generar un corrent elèctric altern. L'energia capaç de moure l'eix del motor és precisament la cinètica del vehicle. D'aquesta forma, s'aconsegueix frenar el vehicle perquè la força que es necessita per moure la bobina sobre l'imant surt precisament de la inèrcia del vehicle.

El segon tipus de frens tenen sentit quan la quantitat d'energia dissipada sigui prou significativa respecte del total. En el cas d'un tren, on la massa és descomunal, aquest terme pot arribar a ser molt important. Per veure'n un exemple calculem quanta energia es perd en un AVE si, anant a 300 km/h, frenem en un sector per algun motiu fins a un avelocitat de 200 km/h. La variació d'energia cinètica serà

$$\Delta E_c = \frac{1}{2}m(v_f^2 - v_i^2) = \frac{1}{2}4.25 \cdot 10^5(90.3^2 - 55.5^2) = 1.08 \cdot 10^9 \text{ J}. \quad (1.22)$$

Si frenem amb uns frens reostàtics tota aquesta energia es perd en forma de calor. Una pregunta interessant que ens podem fer es, si recuperéssim la meitat d'aquesta energia, quants kilòmetres a velocitat màxima podríem recórrer. Si considerem la força de fricció aerodinàmica, la distància seria

$$\Delta x = \frac{E}{F_a} = \frac{5.4 \cdot 10^8}{5.61 \cdot 10^4} = 9.6 \cdot 10^3 \text{ m} = 9.6 \text{ Km!!} \tag{1.23}$$

Aquesta dada és prou explicativa dels motius que porten a la indústria ferroviaria a crear models de trens que recuperin l'energia cinètica.

L'energia recuperada en un tren no pot ser enmagatzemada en el mateix tren per diversos motius. Les bateries que enmagatzemen aquesta energia no són, fins al moment, prou estables i segures com per posar-les en un transport públic. Exemples d'aquesta inestabilitat els podem veure en els accidents ocorreguts durant els primers anys d'implementació dels KERS en la Fòrmula 1. Un segon motiu és la manca de necessitat d'enmagatzemar l'energia si disposem d'una subestació que la pot reaprofitar en tot moment.

Un cas particular força original del reaprofitament de l'energia cinètica el constitueixen les xarxes de tramvia d'algunes ciutats on aquest sistema de transport és força habitual, com pot ser el d'Amsterdam. En aquestes xarxes, l'energia elèctrica que s'obté del reaprofitament en una frenada és utilitzat directament per un altra tranvia que en aquell mateix moment està accelerant. Així doncs, l'energia del sistema va entrant i sortint dels tramvies en funció de les necessitats perquè sempre hi ha en tot moment vehicles que cedeixen i vehicles que absorbeixen energia. Per poder tenir un sistema com aquest, és necessari que es compleixin dues condicions. La primera és que hi hagi un elevat nombre de vehicles per assegurar que tenim en tot moment demandants i generadors. L'altra condició és que la distància entre vehicles no sigui tan elevada com per fer que l'energia es dissipi a traves de la xarxa. Aquestes condicions fan inviable aquest tipus de disseny en xarxes com les de rodalies.

1.5 Contaminació acústica

Un dels inconvenients del transpot ferroviari és l'elevada contaminació acústica que generen. Viure al costat d'una línia férrea pot arribar a ser molt molest. Per fer-nos una idea, a uns 50 metres de distància, la intensitat sonora que surt d'un tren en marxa és d'aproximadament 80 dB. Calculem primerament quin és el percentetge de l'energia que representa el so respecte del total d'un tres que estimarem en aproximadament 1 MW.

La intensitat sonora es defineix com

$$\beta = 10 \log \frac{I}{I_0}, \tag{1.24}$$

a partir d'aquesta equació podem calcular el flux d'energia a partir dels 80 dB que hem pres de referència

$$I = I_0 \exp \beta/10 = 10^{-12} 10^(80/10) = 10^{-4} \mathrm{W/m^2}. \tag{1.25}$$

Aquesta quantitat s'ha de multiplicar per l'àrea sobre la que s'està repartint l'energia. En el nostre cas és igual a la meitat de la superfície d'una esfera de 50 m de radi.

$$P = 2\pi R^2 I = 2\pi \cdot 50^2 \cdot 10^{-4} = 1.57\, W. \tag{1.26}$$

Veiem doncs que la quantitat d'energia que es dissipa en forma de so resulta menyspreable respecte del total del tren.

Un segon aspecte que resulta interessant estudiar és la distància a la que podem viure d'una línia férrea. Els límits d'intensitat sonora per llei dins d'un habitatge es troben en promig prop de 45 dB durant el dia i de 30 durant la nit. Una de les preguntes que ens podem fer és a quina distància hem d'estar de la font per tal de sentir com a màxim aquest nivell d'intensitat. 45 decibels equivalen a un flux d'energia de

$$I = I_0 \exp \beta/10 = 10^{-12} 10^(45/10) = 3.16 \cdot 10^{-8}\ \mathrm{W/m^2}. \tag{1.27}$$

La distància a la que ens hem de posar per tal que el tren anterior, amb una potència emesa total de 1.57 W, provoqui aquesta intensitat sonora és de

$$R = \sqrt{\frac{P}{2\pi I}} = \sqrt{\frac{1.57}{2\pi \cdot 3.16 \cdot 10^{-8}}} = 2811\ \mathrm{m}. \tag{1.28}$$

Obviament, aquestes distàncies no són raonables, ja que implicaria que les línies de tren no podrien passar per les ciutats. Un mètode per evitar aquesta molèstia és el d'aillar els habitatges que es troben propers a l'estació amb vidres prou gruixuits com per aïllar acústicament el so que els arriba de l'exterior. Una fracció de l'energia sonora entra a la casa, però una part rebota sobre els vidres, fent que la intensitat sonora que escoltem sigui significativament inferior. Quan anem a comprar vidres aïllant del so, la característica a considerar és la reducció en decibels que aquesta imposa. Uns bons vidres aïllants tenen com a característica 30 dB de reducció. Calculem què significa en energia aquesta dada.

Si la diferència entre dins i fora és de 30 decibels, això vol dir que el quocient entre intensitat val

$$\frac{I_d}{I_f} = \frac{I_0 10^{\beta_d/10}}{I_0 10^{\beta_f/10}} = 10^{\frac{(\beta_f - 30)}{10} - \frac{\beta_f}{10}} = 10^{-3}. \tag{1.29}$$

Així doncs tan sols un 0.1% de l'energia que arriba a la finestra aconsegueix atravesar-la cap a l'interior de l'habitatge.

Exercicis

1. Comparem el consum d'un tren amb el del vehicle particular. Tindrem en compte les dades:

	Tren	Cotxe
Massa (tones)	200	1.5
Secció transversal (m^2)	9	2
Coeficient aerodinàmic	1	0.3
Força fregament intern (N)	2000	20

   a) Quantes vegades més energia necessitem per accelerar un tren de 0 a 80 Km/h que un cotxe (SENSE tenir en compte cap efecte de fregament)?

   b) Si considerem que l'ocupació del vehicle particular és de 2 persones/vehicle, quina ha de ser l'ocupació mínima del tren per a assegurar-nos que aquest sigui més eficient només en el tram d'acceleració?

   c) Quantes vegades més potència necessitem per a mantenir un tren a velocitat constant de 80 km/h que un cotxe, tenint en compte tant fregaments amb l'aire com interns?

   d) Comptant només el tram de velocitat constant, quina és la velocitat mínima a què s'ha d'anar per tal que sigui més eficient transportar en un sol tren a 100 persones que fer-ho en cotxe (suposant de nou que hi ha 2 persones/cotxe)?

2. Un avió de vols comercials típic (Airbus A320) té una massa, quan està ple, d'uns 70.000 Kg i una àrea efectiva d'uns 120 m^2. Amb tot això podem estimar el seu consum

   a) Calculeu l'energia necessària per a accelerar l'avió des de 0 Km/h fins a la seva velocitat de creuer (820 Km/h).

   b) Quantes vegades més gran és el valor anterior que l'energia que cal per a accelerar un cotxe de 1.500 Kg des de 0 fins a 100 Km/h?

   c) La densitat de l'aire atmosfèric decreix amb la distància h d'acord amb la fòrmula $\rho = \rho_0 e^{-h/H}$, on ρ_0 és la densitat a nivell del mar (1,2 Kg/m^3) i H és un valor constant igual a 8500 metres. Si l'avió circula típicament a 10.000 metres d'alçada calculeu la densitat d'aire que hi troba.

d) A partir del resultat anterior i agafant un coeficient aerodinàmic de 0,03 (els coeficients dels avions són molt petits, d'aquest ordre) deduiu la potència que consumeix l'avió degut al fregament amb l'aire a la seva velocitat de creuer.

e) Suposant que tot el consum fos conseqüència del fregament amb l'aire i que el motor de l'avió té un rendiment del 20% calculeu el consum en Kilograms de combustible per segon. (Poder calorífic típic: 40.000 KJ/Kg).

3. Els trens de levitació magnètica representen una nova tecnologia que s'ha estés en alguns països, especialment al Japó. Aquests trens floten en l'aire mitjançant un sistema d'atracció i repulsió entre imans, la qual cosa evita els fregaments amb la via i per tant el desgast dels seus mecanismes. En algunes notícies es pot llegir que aquests trens consumeixen menys de la meitat de l'energia que un tren convencional anant a la mateixa velocitat. Com sabem, un tren de llarg recorregut bàsicament consumeix energia per a véncer els fregaments amb l'aire.

   a) Calculeu la despesa energètica d'un tren d'alta velocitat TGV anant a 400 Km/h, sabent que té un coeficient aerodinàmic de 1 i una àrea frontal de 10 m^2.

   b) Calculeu la despesa energètica del Transrapid TR-07, un tren de levitació alemany, anant també a 400 Km/h i sabent que el seu coeficient aerodinàmic és 0.56 i la seva àrea efectiva és de 13 m^2. Es certa l'afirmació de què el tren de levitació magnètica gasta molta menys energia?

   c) A la despesa derivada dels fregaments amb l'aire el tren de levitació ha d'afegir fregaments de tipus magnètic que apareixen com a conseqüència dels mateixos imans. Si aquest fregament augmenta en un 20% la despesa energètica, quin dels dos trens consumeix més?

   d) Finalment cal tenir en compte que la capacitat dels dos trens no és la mateixa. El TGV pot transportar a 385 pasatgers mentre que el Transrapid només 194. Quina és el consum energètic per passatger en cada cas?

   e) Si tecnològicament aconseguíssim eliminar els fregaments de tipus magnètic i aconseguíssim fer un tren de levitació amb les mateixes dimensions que el TGV, quanta energia ens arribaríem a estalviar?