

I. DISPOSICIONS GENERALS

MINISTERI DE LA PRESIDÈNCIA, RELACIONS AMB LES CORTS I IGUALTAT

17008 *Ordre PCI/1319/2018, de 7 de desembre, per la qual es modifica l'annex II del Reial decret 1513/2005, de 16 de desembre, pel qual es desplega la Llei 37/2003, de 17 de novembre, del soroll, pel que fa a l'avaluació del soroll ambiental.*

La Directiva 2002/49/CE del Parlament Europeu i del Consell, de 25 de juny de 2002, sobre avaluació i gestió del soroll ambiental, té com a objectiu establir un enfocament comú destinat a evitar, prevenir o reduir amb caràcter prioritari els efectes nocius, incloses les molèsties, de l'exposició al soroll ambiental.

Per a això, s'ha de determinar l'exposició al soroll ambiental a través de la cartografia del soroll, amb mètodes d'avaluació comuns, s'ha de garantir la disponibilitat pública de la informació relativa al soroll ambiental i als seus efectes, i s'han d'adoptar plans d'acció basats en els resultats de la cartografia del soroll, amb vista a prevenir i reduir el soroll ambiental.

Per avaluar l'exposició al soroll ambiental, la norma europea estableix en el seu annex II els mètodes d'avaluació per als indicadors de soroll que preveu l'article 6 d'aquesta. Així mateix, l'article 12 preveu que la Comissió ha de procedir a adaptar al progrés tècnic i científic, entre d'altres, l'annex II esmentat.

Aquesta directiva es va transposar a l'ordenament jurídic espanyol mitjançant la Llei 37/2003, de 17 de novembre, del soroll, i dos reials decrets que la despleguen, en concret el Reial decret 1513/2005, de 16 de desembre, pel qual es desplega la Llei 37/2003, de 17 de novembre, del soroll, pel que fa a l'avaluació i gestió del soroll ambiental, i el Reial decret 1367/2007, de 19 d'octubre, pel qual es desplega la Llei 37/2003, de 17 de novembre, del soroll, pel que fa a zonificació acústica, objectius de qualitat i emissions acústiques.

El Reial decret 1513/2005, de 16 de desembre, té per objecte l'avaluació i la gestió del soroll ambiental amb la finalitat de prevenir, reduir o evitar els efectes nocius, incloses les molèsties, derivades de l'exposició al soroll ambiental, de conformitat amb el que disposa la Directiva 2002/49/CE del Parlament Europeu i del Consell, de 25 de juny de 2002. Desplega les previsions legals relatives als índexs de soroll que s'han de considerar en la preparació i revisió dels mapes estratègics de soroll i que detalla l'annex I, així com els mètodes d'avaluació per determinar aquests índexs, que especifica l'annex II.

El juliol de 2015 es va publicar en el «Diari Oficial de la Unió Europea» la Directiva 2015/996 de la Comissió, de 19 de maig de 2015, per la qual s'estableixen mètodes comuns d'avaluació del soroll en virtut de la Directiva 2002/49/CE del Parlament Europeu i del Consell. Mitjançant aquesta nova Directiva se substitueix l'annex II de la Directiva 2002/49/CE del Parlament Europeu i del Consell, de 25 de juny de 2002.

Amb l'objectiu de complir les obligacions del Regne d'Espanya com a Estat membre, s'aprova aquesta Ordre, mitjançant la qual es transposa la Directiva (UE) 2015/996 de la Comissió a l'ordenament jurídic espanyol i se substitueix l'annex II del Reial decret 1513/2005, de 16 de desembre, per adaptar-lo al progrés tècnic.

Amb la modificació de l'annex II del Reial decret 1513/2005, de 16 de desembre, se substitueixen els mètodes de càlcul dels índexs de soroll L_{den} i L_n utilitzats actualment per a l'avaluació del soroll industrial, del soroll d'aeronaus, del soroll de trens i del soroll del trànsit rodat, per una metodologia comuna de càlcul desenvolupada per la Comissió Europea a través del projecte «Mètodes comuns d'avaluació del soroll a Europa (CNOSSOS-EU)». La utilització d'aquesta metodologia és vinculant per als estats membres a partir del 31 de desembre de 2018, i per tant deixen de ser aplicables els mètodes de

l'actual annex II, que, tal com assenyalen els respectius articles 6.2 de la Directiva 2002/49/CE i del mateix Reial decret 1513/2005, de 16 de desembre, només estarien en vigor mentre no s'adoptessin els mètodes que ara s'estableixen.

Aquesta Ordre té el seu fonament constitucional a l'article 149.1, apartats 16a i 23a de la Constitució, que atribueixen a l'Estat, respectivament, les competències exclusives en matèria de legislació bàsica sobre bases i coordinació general de la sanitat i en matèria de protecció del medi ambient, sense perjudici de les facultats de les comunitats autònomes d'establir normes addicionals de protecció.

En virtut de l'article 13 de la Llei 37/2003, de 17 de novembre, del soroll, el Govern ha de regular «els mètodes d'avaluació per determinar els valors dels índexs acústics esmentats a l'article 12 i dels corresponents efectes de la contaminació acústica». Així mateix, d'acord amb la seva disposició final segona, s'habilita el Govern per dictar les normes de desplegament que requereixi la Llei esmentada. A part d'això, a través de l'habilitació que conté la disposició final segona, apartat 2, del Reial decret 1513/2005, de 16 de desembre, pel qual es desplega la Llei 37/2003, de 17 de novembre, del soroll, pel que fa a l'avaluació i gestió del soroll ambiental, es faculden els ministeris de Sanitat i Consum i de Medi Ambient, avui Ministeri de Sanitat, Consum i Benestar Social i Ministeri per a la Transició Ecològica, per introduir conjuntament o separadament, segons les matèries de què es tracti, i en l'àmbit de les seves competències, totes les modificacions que siguin necessàries per mantenir-lo adaptat a les innovacions que es produeixen en la normativa europea.

Aquesta Ordre ministerial es dicta d'acord amb els principis de bona regulació i, en concret, amb els de necessitat, eficàcia, proporcionalitat, seguretat jurídica, transparència i eficiència, quant al seu contingut i la seva tramitació, de conformitat amb el que disposa l'article 129 de la Llei 39/2015, d'1 d'octubre, del procediment administratiu comú de les administracions públiques.

Amb caràcter previ a la redacció d'aquesta norma s'ha substanciat la consulta pública regulada a l'article 133 de la Llei 39/2015, d'1 d'octubre, del procediment administratiu comú de les administracions públiques, en relació amb l'article 26 de la Llei 50/1997, de 27 de novembre, del Govern. En la seva elaboració s'han consultat les comunitats autònomes i les entitats representatives dels sectors afectats; així mateix, s'ha sotmès al tràmit d'informació pública i s'ha remès al Consell Assessor de Medi Ambient, en aplicació de les previsions de la Llei 27/2006, de 18 de juliol, per la qual es regulen els drets d'accés a la informació, de participació pública i d'accés a la justícia en matèria de medi ambient (incorpora les directives 2003/4/CE i 2003/35/CE).

En virtut d'això, a proposta de les ministres per a la Transició Ecològica i de Sanitat, Consum i Benestar Social, d'acord amb el Consell d'Estat, dispo:

Article únic. *Modificació de l'annex II del Reial decret 1513/2005, de 16 de desembre, pel qual es desplega la Llei 37/2003, de 17 de novembre, del soroll, pel que fa a l'avaluació del soroll ambiental.*

Se substitueix el contingut de l'annex II del Reial decret 1513/2005, de 16 de desembre, pel qual es desplega la Llei 37/2003, de 17 de novembre, del soroll, pel que fa a l'avaluació del soroll ambiental, pel nou contingut de l'annex que s'inclou en aquesta Ordre.

Disposició final primera. *Fonament constitucional i caràcter bàsic.*

Aquesta Ordre es dicta a l'empara de les competències exclusives que a l'Estat atorga l'article 149.1.16a i 23a de la Constitució espanyola, en matèria de bases i coordinació general de la sanitat i de legislació bàsica sobre protecció del medi ambient, sense perjudici de les facultats de les comunitats autònomes d'establir normes addicionals de protecció.

Disposició final segona. *Incorporació del dret de la Unió Europea.*

Mitjançant aquesta Ordre s'incorpora al dret espanyol la Directiva 2015/996 de la Comissió, de 19 de maig de 2015, per la qual s'estableixen mètodes comuns d'avaluació del soroll en virtut de la Directiva 2002/49/CE del Parlament Europeu i del Consell.

Disposició final tercera. *Entrada en vigor.*

Aquesta Ordre entra en vigor el dia 31 de desembre de 2018.

Madrid, 7 de desembre de 2018.– La vicepresidenta del Govern i ministra de la Presidència, Relacions amb les Corts i Igualtat, Carmen Calvo Poyato.

ANNEX

“ANNEX II

MÈTODES D’AVALUACIÓ PER ALS INDICADORS DE SOROLL

(als quals fa referència l’article 6 del Reial decret 1513/2005)

1. INTRODUCCIÓ.

Els valors de L_{den} i L_n es determinen mitjançant un càlcul en el punt d’avaluació, segons el mètode que estipula el capítol 2 i les dades que descriu el capítol 3. Els mesuraments es poden efectuar de conformitat amb el que estipula el capítol 4.

2. MÈTODES COMUNS PER A L’AVALUACIÓ DEL SOROLL.

2.1. Disposicions generals — Soroll del trànsit viari, del trànsit ferroviari i soroll industrial

2.1.1. Indicadors, gamma de freqüències i definicions de banda.

Els càlculs de soroll es defineixen en la gamma de freqüències de les bandes de vuitena compreses entre 63 Hz i 8 kHz. Els resultats de la banda de freqüències es faciliten en l’interval de freqüències corresponent.

Els càlculs s’efectuen per bandes de vuitena per al soroll del trànsit viari, del trànsit ferroviari i industrial, excepte per a la potència sonora de la font de soroll ferroviari, que utilitza bandes de terç de vuitena. En el cas del soroll del trànsit viari, del trànsit ferroviari i industrial, de conformitat amb aquests resultats de banda de vuitena, el nivell sonor mitjà a llarg termini amb ponderació A per al dia, la tarda i la nit, tal com estableixen l’annex I i l’article 5 de la Directiva 2002/49/CE, es calcula mitjançant la suma de totes les freqüències.

$$L_{Aeq,T} = 10 \times \lg \sum_{i=1} 10^{(L_{eq,T,i} + A_i)/10} \quad (2.1.1)$$

On:

A_i indica la correcció amb ponderació A segons la norma CEI 61672-1

i = índex de la banda de freqüències

T és el període de temps corresponent al dia, la tarda o la nit.

Paràmetres del soroll:

| | | |
|---------------|---|-------------------------------------|
| L_p | Nivell instantani de pressió sonora | [dB] (re. $2 \cdot 10^{-5}$ Pa) |
| $L_{Aeq,LT}$ | Nivell sonor continu equivalent global (total) a llarg termini L_{Aeq} a causa de totes les fonts i les fonts d’imatge en el punt R | [dB] (re. $2 \cdot 10^{-5}$ Pa) |
| L_w | Nivell de potència sonora «in situ» d’una font puntual (en moviment o constant) | [dB] (re. 10^{-12} W) |
| $L_{w,i,dir}$ | Nivell de potència sonora «in situ» direccional per a la banda de freqüències i | [dB] (re. 10^{-12} W) |
| L_w' | Nivell mitjà de potència sonora «in situ» per metre de font lineal | [dB/m] (re. 10^{-12} W) |

Altres paràmetres físics:

| | | |
|-------|---|---------|
| p | Arrel quadràtica mitjana (RMS) de la pressió sonora instantània | [Pa] |
| p_0 | Pressió sonora de referència = $2 \cdot 10^{-5}$ Pa | [Pa] |
| W_0 | Potència sonora de referència = 10^{-12} W | [watt] |

2.1.2. Marc de qualitat.

Precisió dels valors d'entrada.

Tots els valors d'entrada que afectin el nivell d'emissions d'una font s'han de determinar almenys amb una precisió corresponent a una incertesa de $\pm 2\text{dB(A)}$ en el nivell d'emissions de la font (deixant invariables tots els altres paràmetres).

Ús dels valors per defecte.

Quan s'apliqui el mètode, les dades d'entrada han de reflectir l'ús real. En general, no s'han d'utilitzar valors d'entrada per defecte ni estimats. Els valors d'entrada per defecte i els estimats s'accepten si la recopilació de dades reals suposa costos molt alts.

Qualitat del programari utilitzat per als càlculs.

El programari utilitzat per fer els càlculs ha d'acreditar la conformitat amb els mètodes aquí descrits mitjançant una certificació de resultats derivats dels assajos efectuats.

El programari utilitzat per al càlcul dels nivells de soroll en l'ambient exterior ha de complir els requeriments que estableix la norma ISO 17534 pel que fa a qualitat i garantia de qualitat acústica i a les recomanacions generals per als assajos (test) i interface de control de qualitat, així com les recomanacions per a l'aplicació del control de qualitat en l'execució dels mètodes que descriu aquest annex pel programari d'acord amb la norma ISO 17534-1.

2.2. Soroll del trànsit viari.

2.2.1. Descripció de la font.

Classificació dels vehicles.

La font de soroll del trànsit viari s'ha de determinar mitjançant la combinació de l'emissió de soroll de cadascun dels vehicles que formen el flux del trànsit. Aquests vehicles s'agrupen en cinc categories independents en funció de les característiques que tinguin pel que fa a l'emissió de soroll:

- Categoria 1: Vehicles lleugers.
- Categoria 2: Vehicles pesants mitjans.
- Categoria 3: Vehicles pesants.
- Categoria 4: Vehicles de dues rodes.
- Categoria 5: Categoria oberta.

En el cas dels vehicles de dues rodes, es defineixen dues subclasses independents per als ciclomotors i les motocicletes de més potència, ja que els modes de conducció són diversos i, a més, solen variar significativament en nombre.

S'han d'utilitzar les primeres quatre categories, i la cinquena és opcional. Es preveu establir una altra categoria per als nous vehicles que es puguin fabricar en el futur que presentin característiques suficientment diferents en termes d'emissions de soroll. Aquesta categoria podria englobar, per exemple, els vehicles elèctrics o híbrids o qualsevol vehicle que es fabriqui en el futur que difereixi significativament dels de les categories 1 a 4.

Els detalls de les diferents classes de vehicles es faciliten en el quadre [2.2.a].

Quadre [2.2.a]
Classes de vehicles

| Categoria | Nom | Descripció | Categoria de vehicle en CE Homologació de tipus del vehicle complet ¹ | |
|-----------|--------------------------|---|--|----------------|
| 1 | Vehicles lleugers | Turismes, camionetes $\leq 3,5$ tones, tot terrenys, ² vehicles polivalents, ³ inclosos remolcs i caravanes | M1 i N1 | |
| 2 | Vehicles pesants mitjans | Vehicles mitjans, camionetes $> 3,5$ tones, autobusos, autocaravanes, entre d'altres, amb dos eixos i dos pneumàtics a l'eix de darrere | M2, M3 i N2, N3 | |
| 3 | Vehicles pesants | Vehicles pesants, turismes, autobusos, amb tres o més eixos | M2 i N2 amb remolc, M3 i N3 | |
| 4 | Vehicles de dues rodes | 4a | Ciclomotors de dues, tres i quatre rodes | L1, L2, L6 |
| | | 4b | Motocicletes amb i sense sidecar, tricicles i quadricicles | L3, L4, L5, L7 |
| 5 | Categoria oberta | La seva definició s'ha d'atendir a les necessitats futures | N/A | |

Nombre i situació de fonts sonores equivalents.

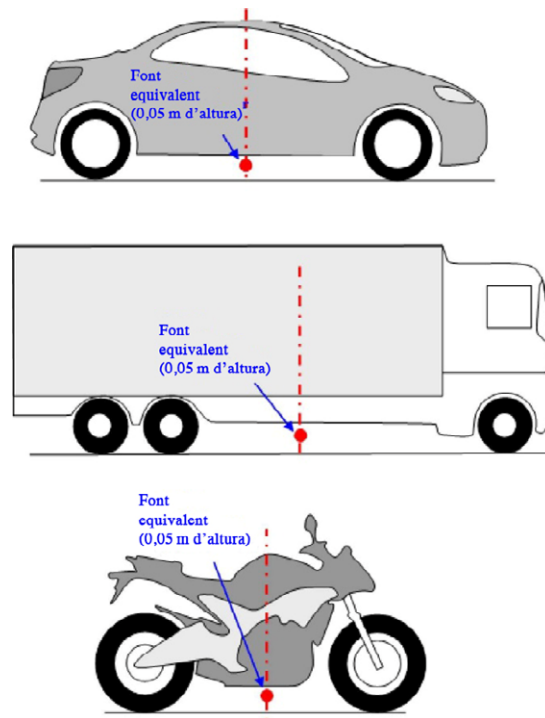
En aquest mètode, cada vehicle (categories 1, 2, 3, 4 i 5) es representa mitjançant una font d'un sol punt que s'irradia d'una manera uniforme en el semiespai per damunt del sòl. La primera reflexió sobre el paviment es tracta de manera implícita. Com il·lustra la figura [2.2.a], aquesta font puntual s'ubica a 0,05 m per damunt del paviment.

¹ Directiva 2007/46/CE del Parlament Europeu i del Consell, de 5 de setembre de 2007 (DO L 263 de 9.10.2007, p. 1) per la qual es crea un marc per a l'homologació dels vehicles de motor i dels remolcs, sistemes, components i unitats tècniques independents destinats als vehicles esmentats.

² Tot terrenys.

³ Vehicles polivalents.

Figura [2.2.a]
Ubicació de la font puntual equivalent en vehicles lleugers (categoria 1), vehicles pesants (categories 2 i 3) i vehicles de dues rodes (categoria 4)



El flux de trànsit es representa mitjançant una font lineal. Quan es modelitza una carretera amb diversos carrils, l'ideal és representar cada carril amb una font lineal ubicada al centre de cada carril. No obstant això, també es pot dibuixar una font lineal al mig d'una carretera de doble sentit o una font lineal per cada calçada en el carril exterior de carreteres amb diversos carrils.

Nivell de potència sonora. (Emissió)

Consideracions generals.

La potència sonora de la font es defineix en el «camp semilliu», de manera que la potència sonora comprèn l'efecte de la reflexió sobre el sòl immediatament sota la font modelitzada en la qual no existeixen objectes perturbadors en el seu entorn més proper, excepte en el cas de la reflexió sobre el paviment que no es produeix immediatament sota la font modelitzada.

Intensitat de trànsit.

L'emissió d'un flux de trànsit es representa mitjançant una font lineal caracteritzada per la seva potència sonora direccional per metre i per freqüència. Això es correspon amb la suma de l'emissió sonora de cadascun dels vehicles del flux de trànsit, tenint en compte el temps durant el qual els vehicles circulen pel tram de carretera considerat. La implementació de cada vehicle del flux requereix l'aplicació d'un model de trànsit.

Si se suposa un trànsit continu de vehicles Q_m de la categoria m per hora, amb una velocitat mitjana de v_m (en km/h), la potència sonora direccional per metre en la banda de freqüències i de la font lineal $L_{W,eq,line,i,m}$ es defineix mitjançant:

$$L_{W',eq,line,i,m} = L_{W,i,m} + 10 \times \lg \left(\frac{Q_m}{1\,000 \times v_m} \right) \quad (2.2.1)$$

on

$L_{W,i,m}$ és el nivell de potència sonora direccional d'un únic vehicle.

$L_{W',m}$ s'expressa en dB (re. 10^{-12} W/m). Els nivells de potència sonora es calculen per a cada banda de vuitena i compresa entre 63 Hz i 8 kHz.

Les dades d'intensitat de trànsit Q_m s'han d'expressar com una mitjana anual horària, per període de temps (dia, tarda i nit), per classe de vehicle i per font lineal. Per a totes les categories s'han d'utilitzar les dades d'entrada d'intensitat de trànsit derivades de l'aforament de trànsit o dels models de trànsit.

La velocitat v_m és una velocitat representativa per categoria de vehicle: en la majoria dels casos, és la velocitat màxima permesa més baixa per al tram de carretera i la velocitat màxima permesa per a la categoria de vehicles. Si no estan disponibles les dades de mesuraments locals, s'ha d'utilitzar la velocitat màxima permesa per a la categoria de vehicles.

Vehicle individual.

En la consideració de la circulació de vehicles, se suposa que tots els vehicles de la categoria m circulen a la mateixa velocitat, és a dir, v_m , la velocitat mitjana del flux de vehicles de la categoria.

Un vehicle de carretera es modelitza mitjançant un conjunt d'equacions matemàtiques que representen les principals fonts de soroll:

1. Soroll de rodolament per la interacció produïda pel contacte pneumàtic-calçada.
2. Soroll de propulsió produït per la força de transmissió (motor, escapament, etc.) del vehicle. El soroll aerodinàmic s'incorpora a la font del soroll de rodolament.

En el cas dels vehicles lleugers, mitjans i pesants (categories 1, 2 i 3), la potència sonora total es correspon amb la suma energètica del soroll de rodolament i del soroll de propulsió. Per tant, el nivell de potència sonora total de les línies de fonts $m = 1, 2$ o 3 es defineix mitjançant:

$$L_{W,i,m}(v_m) = 10 \times \lg(10^{L_{WR,i,m}(v_m)/10} + 10^{L_{WP,i,m}(v_m)/10}) \quad (2.2.2)$$

on $L_{WR,i,m}$ és el nivell de potència sonora per al soroll de rodolament i $L_{WP,i,m}$, el nivell de potència sonora per al soroll de propulsió. Això és vàlid per a totes les gammes de velocitats. Per a velocitats inferiors a 20 km/h, s'ha d'utilitzar el mateix nivell de potència sonora definit per la fórmula per a $v_m = 20$ km/h.

Per als vehicles de dues rodes (categoria 4), per a la font només es considera el soroll de propulsió:

$$L_{W,i,m=4}(v_m = 4) = L_{WP,i,m=4}(v_m = 4) \quad (2.2.3)$$

Això és vàlid per a tots els rangs de velocitats. Per a velocitats inferiors a 20 km/h, s'ha d'utilitzar el mateix nivell de potència sonora definit per la fórmula per a $v_m = 20$ km/h.

2.2.2. Condicions de referència.

Els coeficients i les equacions de caracterització de la font són vàlids per a les condicions de referència següents:

- una velocitat constant del vehicle;
- una carretera sense pendent;
- una temperatura de l'aire $\tau_{ref} = 20$ °C;
- un paviment de referència virtual, format per aglomerat asfàltic dens 0/11 i paviment barrejat SMA 0/11, amb una antiguitat d'entre 2 i 7 anys i en un estat de manteniment representatiu;
- un paviment sec;
- pneumàtics sense claus.

2.2.3. Soroll de rodolament.

Equació general.

El nivell de potència sonora del soroll de rodolament en la banda de freqüències i per a un vehicle de la classe $m = 1, 2$ o 3 es defineix com:

$$L_{WR,i,m} = A_{R,i,m} + B_{R,i,m} \times \lg\left(\frac{v_m}{v_{ref}}\right) + \Delta L_{WR,i,m} \quad (2.2.4)$$

Els coeficients $A_{R,i,m}$ i $B_{R,i,m}$ es donen en bandes de vuitena per a cada categoria de vehicle i per a una velocitat de referència $v_{ref} = 70$ km/h. $\Delta L_{WR,i,m}$ es correspon amb la suma dels coeficients de correcció que s'han d'aplicar a l'emissió de soroll de rodolament per a condicions específiques del ferm o del vehicle diferents de les condicions de referència:

$$\Delta L_{WR,i,m} = \Delta L_{WR,road,i,m} + \Delta L_{studdedtyres,i,m} + \Delta L_{WR,acc,i,m} + \Delta L_{W,temp} \quad (2.2.5)$$

$\Delta L_{WR,road,i,m}$ representa l'efecte que té en el soroll de rodolament un paviment amb propietats sonores diferents de les del paviment (superfície de rodolament de referència virtual, com defineix el capítol 2.2.2). Inclou tant l'efecte en la propagació com en la generació.

$\Delta L_{studdedtyres,i,m}$ és un coeficient de correcció que té en compte el soroll de rodolament superior dels vehicles lleugers equipats amb pneumàtics amb claus.

$\Delta L_{WR,acc,i,m}$ té en compte l'efecte que té en el soroll de rodolament en una intersecció amb semàfors o una rotonda. Integra l'efecte que la variació de velocitat té en l'emissió sonora.

$\Delta L_{W,temp}$ és un terme de correcció per a una temperatura mitjana τ diferent de la temperatura de referència $\tau_{ref} = 20$ °C.

Correcció per als pneumàtics amb claus.

En situacions en què un nombre important de vehicles lleugers del flux de trànsit utilitzen pneumàtics amb claus durant diversos mesos a l'any, s'ha de tenir en compte l'efecte induït en el soroll de rodolament. Per a cada vehicle de la categoria $m = 1$ equipat amb pneumàtics amb claus, es calcula un increment del soroll de rodolament en funció de la velocitat mitjançant les expressions següents:

$$\Delta_{stud,i}(v) = \begin{cases} a_i + b_i \times \lg(50/70) & v < 50 \text{ km/h} \\ a_i + b_i \times \lg(v/70) & 50 \leq v \leq 90 \text{ km/h} \\ a_i + b_i \times \lg(90/70) & v > 90 \text{ km/h} \end{cases} \quad (2.2.6)$$

on els coeficients a_i i b_i es proporcionen per a cada banda de vuitena.

L'augment de l'emissió de soroll de rodolament s'obté tenint en compte únicament la part proporcional de vehicles lleugers amb pneumàtics amb claus durant un període limitat T_s (en mesos) al llarg de l'any. Si $Q_{stud, ratio}$ és la ràtio de la intensitat horària de vehicles lleugers equipats amb pneumàtics amb claus que circulen en un període T_s (en mesos), llavors la proporció mitjana anual de vehicles equipats amb pneumàtics amb claus p_s s'expressa mitjançant:

$$p_s = Q_{stud, ratio} \times \frac{T_s}{12} \quad (2.2.7)$$

La correcció resultant que s'ha d'aplicar a l'emissió de potència sonora de rodolament a causa de l'ús de pneumàtics amb claus per a vehicles de la categoria $m = 1$ en la banda de freqüències i és:

$$\Delta L_{studdedtyres,i,m=1} = 10 \times \lg\left[\left(1 - p_s\right) + p_s \cdot 10^{\frac{\Delta_{stud,i,m=1}}{10}}\right] \quad (2.2.8)$$

Per als vehicles de totes les altres categories no s'aplica cap correcció:

$$\Delta L_{\text{studdedtyres},i,m \neq 1} = 0 \quad (2.2.9)$$

Efecte de la temperatura de l'aire en la correcció del soroll de rodolament.

La temperatura de l'aire afecta l'emissió de soroll de rodolament; de fet, el nivell de potència sonora de rodolament disminueix quan augmenta la temperatura de l'aire. Aquest efecte s'introdueix en la correcció per tipus de paviment. Les correccions del paviment se solen avaluar per a una temperatura de l'aire de $\tau_{\text{ref}} = 20$ °C. Si la temperatura de l'aire mitjana anual en °C és diferent, l'emissió del soroll de rodolament s'ha de corregir amb la fórmula:

$$\Delta L_{W,\text{temp},m}(\tau) = K_m \times (\tau_{\text{ref}} - \tau) \quad (2.2.10)$$

El terme de correcció és positiu (és a dir, que el soroll augmenta) per a temperatures inferiors a 20 °C i negatiu (és a dir, que el soroll disminueix) per a temperatures més altes. El coeficient K depèn de les característiques del paviment i dels pneumàtics i, en general, reflecteix certa dependència de la freqüència. S'ha d'aplicar un coeficient genèric $K_{m=1} = 0,08$ dB/°C per a vehicles lleugers (categoria 1) i $K_{m=2} = K_{m=3} = 0,04$ dB/°C per a vehicles pesants (categories 2 i 3) per a tots els paviments. El coeficient de correcció s'ha d'aplicar de la mateixa manera a totes les bandes de vuitena des de 63 fins a 8.000 Hz.

2.2.4. Soroll de propulsió.

Equació general.

L'emissió de soroll de propulsió comprèn totes les contribucions del motor, el tub d'escapament, les marxos, caixa de canvis, engranatges, l'entrada d'aire, etc. El nivell de potència sonora del soroll de propulsió en la banda de freqüències i per a un vehicle de classe m es defineix com:

$$L_{WP,i,m} = A_{P,i,m} + B_{P,i,m} \times \frac{(v_m - v_{\text{ref}})}{v_{\text{ref}}} + \Delta L_{WP,i,m} \quad (2.2.11)$$

Els coeficients $A_{P,i,m}$ i $B_{P,i,m}$ es donen en bandes de vuitena per a cada categoria de vehicle i per a una velocitat de referència $v_{\text{ref}} = 70$ km/h.

$\Delta L_{WP,i,m}$ es correspon amb la suma dels coeficients de correcció que s'han d'aplicar a l'emissió de soroll de propulsió per a condicions de conducció específiques o condicions regionals diferents de les condicions de referència:

$$\Delta L_{WP,i,m} = \Delta L_{WP,\text{road},i,m} + \Delta L_{WP,\text{grad},i,m} + \Delta L_{WP,\text{acc},i,m} \quad (2.2.12)$$

$\Delta L_{WP,\text{road},i,m}$ té en compte l'efecte del paviment en el soroll de propulsió a causa de l'absorció. El càlcul s'ha de fer de conformitat amb el que especifica el capítol 2.2.6.

$\Delta L_{WP,\text{acc},i,m}$ i $\Delta L_{WP,\text{grad},i,m}$ té en compte l'efecte dels pendents de la carretera i de l'acceleració i la desacceleració dels vehicles en les interseccions. S'han de calcular segons el que preveuen els capítols 2.2.4 i 2.2.5, respectivament.

Efecte dels pendents de la carretera.

El pendent de la carretera té dos efectes en l'emissió de soroll del vehicle: en primer lloc, afecta la velocitat del vehicle i, per consegüent, l'emissió de soroll de rodolament i de propulsió del vehicle; en segon lloc, afecta la càrrega i la velocitat del motor per l'elecció de la marxa i, per tant, l'emissió de soroll de propulsió del vehicle. En aquesta secció només s'aborda l'efecte en el soroll de propulsió, suposant una velocitat constant.

L'efecte que el pendent de la carretera té en el soroll de propulsió es té en compte mitjançant un terme de correcció $\Delta L_{WP,grad,m}$, que és una funció del pendent s (en %), la velocitat del vehicle v_m (en km/h) i la classe de vehicle m . En el cas d'una circulació en dos sentits, és necessari dividir el flux en dos components i corregir la meitat per a la pujada i l'altra meitat per a la baixada. El terme de correcció s'atribueix a totes les bandes de vuitena de la mateixa manera:

Per a $m = 1$

$$\Delta L_{WP,grad,i,m=1}(v_m) = \begin{cases} \frac{\text{Min}(12\%; -s) - 6\%}{1\%} & \text{per a } s < -6\% \\ 0 & \text{per a } -6\% \leq s \leq 2\% \\ \frac{\text{Min}(12\%;s) - 2\%}{1,5\%} \times \frac{v_m}{100} & \text{per a } s > 2\% \end{cases} \quad (2.2.13)$$

Per a $m = 2$

$$\Delta L_{WP,grad,i,m=2}(v_m) = \begin{cases} \frac{\text{Min}(12\%; -s) - 4\%}{0,7\%} \times \frac{v_m - 20}{100} & \text{per a } s < -4\% \\ 0 & \text{per a } -4\% \leq s \leq 0\% \\ \frac{\text{Min}(12\%;s)}{1\%} \times \frac{v_m}{100} & \text{per a } s > 0\% \end{cases} \quad (2.2.14)$$

Per a $m = 3$

$$\Delta L_{WP,grad,i,m=3}(v_m) = \begin{cases} \frac{\text{Min}(12\%; -s) - 4\%}{0,5\%} \times \frac{v_m - 10}{100} & \text{per a } s < -4\% \\ 0 & \text{per a } -4\% \leq s \leq 0\% \\ \frac{\text{Min}(12\%;s)}{0,8\%} \times \frac{v_m}{100} & \text{per a } s > 0\% \end{cases} \quad (2.2.15)$$

Per a $m = 4$

$$\Delta L_{WP,grad,i,m=4} = 0 \quad (2.2.16)$$

La correcció $\Delta L_{WP,grad,m}$ inclou de manera implícita l'efecte que el pendent té en la velocitat.

2.2.5. Efecte de l'acceleració i la desacceleració dels vehicles.

Abans i després de les interseccions regulades per semàfors i les rotondes, s'ha d'aplicar una correcció per a l'efecte de l'acceleració i la desacceleració, tal com es descriu a continuació.

Els termes de correcció per al soroll de rodolament, $\Delta L_{WR,acc,m,k}$, i per al soroll de propulsió, $\Delta L_{WP,acc,m,k}$, són funcions lineals de la distància x (en m) des de la font puntual fins a la intersecció més pròxima de la font lineal corresponent amb una altra font lineal. Aquests termes s'atribueixen a totes les bandes de vuitena de la mateixa manera:

$$\Delta L_{WR,acc,m,k} = C_{R,m,k} \times \text{Max}\left(1 - \frac{|x|}{100}; 0\right) \quad (2.2.17)$$

$$\Delta L_{WP,acc,m,k} = C_{P,m,k} \times \text{Max}\left(1 - \frac{|x|}{100}; 0\right) \quad (2.2.18)$$

Els coeficients $C_{R,m,k}$ i $C_{P,m,k}$ depenen del tipus d'intersecció k ($k = 1$ per a una intersecció regulada per semàfors; $k = 2$ per a una rotonda) i es proporcionen per a cada categoria de vehicles. La correcció comprèn l'efecte del canvi de velocitat en aproximar-se a una intersecció o a una rotonda o en allunyar-se'n.

S'ha de tenir en compte que a una distància $|x| \geq 100$ m, $\Delta L_{WR,acc,m,k} = \Delta L_{WP,acc,m,k} = 0$.

2.2.6. Efecte del tipus de paviment (superfície de rodolament).

Principis generals.

Si es tracta de paviments amb propietats sonores diferents de les del paviment de referència, s'ha d'aplicar un terme de correcció per bandes de freqüència per al soroll de rodolament i el soroll de propulsió.

El terme de correcció del paviment per a l'emissió de soroll de rodolament es calcula mitjançant l'expressió:

$$\Delta L_{WR,road,i,m} = \alpha_{i,m} + \beta_m \times \lg\left(\frac{v_m}{v_{ref}}\right) \quad (2.2.19)$$

On:

$\alpha_{i,m}$ és la correcció en dB a la velocitat de referència v_{ref} per a la categoria m (1, 2 o 3) i per a la banda de freqüència i .

β_m és l'efecte de la velocitat en la reducció de soroll de rodolament per a la categoria m (1, 2 o 3) i és idèntic per a totes les bandes de freqüències.

El terme de correcció del paviment per a l'emissió de soroll de propulsió s'obté mitjançant l'expressió:

$$\Delta L_{WP,road,i,m} = \min\{\alpha_{i,m}; 0\} \quad (2.2.20)$$

Les superfícies absorbents redueixen el soroll de propulsió, mentre que les superfícies no absorbents no l'augmenten.

Efecte de l'antiguitat del paviment en el soroll de rodolament.

Les característiques sonores de les superfícies de rodolament varien amb l'antiguitat i el nivell de manteniment, amb una tendència a què el soroll sigui superior amb el pas del temps. En aquest mètode, els paràmetres de la superfície de rodolament s'han establert perquè siguin representatius del comportament acústic del tipus de superfície de rodolament com a mitjana respecte a la seva vida útil representativa i suposant que s'efectua un manteniment adequat.

2.3. Soroll ferroviari.

2.3.1. Descripció de la font.

Classificació dels vehicles.

Definició de vehicle i tren.

Als efectes d'aquest mètode de càlcul del soroll, un vehicle es defineix com qualsevol subunitat ferroviària independent d'un tren (normalment una locomotora, un automotor, un cotxe de viatgers o un vagó de càrrega) que es pugui moure de manera independent i que es pugui desacoblar de la resta del tren. Es poden donar algunes circumstàncies específiques per a les subunitats d'un tren que formen part d'un conjunt que no es pot desacoblar, per exemple, compartir un bogi entre elles. Als efectes d'aquest mètode de càlcul, totes aquestes subunitats s'agrupen en un únic vehicle.

Així mateix, per a aquest mètode de càlcul, un tren consta d'una sèrie de vehicles acoblats.

En el quadre [2.3.a] es defineix un llenguatge comú per descriure els tipus de vehicles inclosos en la base de dades de les fonts. S'hi presenten els descriptors corresponents que s'han d'utilitzar per classificar tots els vehicles. Aquests descriptors es corresponen amb les propietats del vehicle, que afecten la potència sonora direccional per metre de línia font equivalent modelitzada.

El nombre de vehicles de cada tipus s'ha de determinar en cada tram de via per a cada període considerat en el càlcul del soroll. S'ha d'expressar com un nombre mitjà de vehicles per hora, que s'obté dividint el nombre total de vehicles que circulen durant un període de temps determinat entre la durada en hores del període esmentat (per

exemple, 24 vehicles en 4 hores donen com a resultat 6 vehicles per hora). Es consideren tots els tipus de vehicles que circulen per cada tram de via.

Quadre [2.3.a]
Classificació i descriptors per als vehicles ferroviaris

| Dígit | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---------------------------|---|----------------------------|---|--|
| Descriptor | Tipus de vehicle | Nombre d'eixos per vehicle | Tipus de fre | Elements reductors de soroll en les rodes |
| Explicació del descriptor | Una lletra que descriu el tipus | El nombre real d'eixos | Una lletra que descriu el tipus de fre | Una lletra que descriu el tipus de mesura de la reducció de soroll |
| Possibles descriptors | h vehicle d'alta velocitat (> 200 km/h) | 1 | c bloc de fosa | n cap mesura |
| | m cotxes de passatgers autopropulsats | 2 | k sabates de metall sinteritzat (composite) | d amortidors |
| | p cotxes de passatgers remolcats | 3 | n frenada sense sabates, com a disc, tambor, magnètic | s pantalles |
| | c cotxe autopropulsat i no autopropulsat de tramvia o metre lleuger | 4 | | o altres |
| | d locomotora dièsel | etc. | | |
| | e locomotora elèctrica | | | |
| | a qualsevol vehicle genèric per al transport de mercaderies | | | |
| | o altres (com ara vehicles de conservació) | | | |

Classificació de les vies i estructura portant.

Les vies existents poden variar perquè hi ha diversos elements que contribueixen a les propietats sonores i les caracteritzen. Els tipus de vies utilitzats en aquest mètode s'indiquen en el quadre [2.3.b] següent. Alguns dels elements influeixen significativament en les propietats sonores, mentre que d'altres només tenen efectes secundaris. En general, els elements més importants que influeixen en l'emissió de soroll ferroviari són: la

rugositat del carril, la rigidesa de la placa d'assentament del carril, la base de la via, les juntes dels carrils i el radi de curvatura de la via. De manera alternativa, es poden definir les propietats generals de la via i, en aquest cas, la rugositat del carril i la taxa de deteriorament de la via segons la norma ISO 3095 són dos paràmetres essencials des del punt de vista acústic, a més del radi de curvatura de la via.

El tram de via es defineix com una part d'una única via, en una línia ferroviària o en una estació, en la qual no canvien els components bàsics ni les propietats físiques de la via.

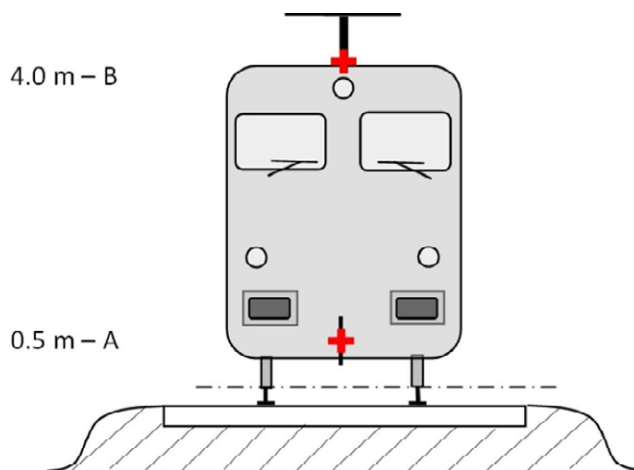
En el quadre [2.3.b] es defineix un llenguatge comú per descriure els tipus de vies inclosos en la base de dades de les fonts.

Quadre
[2.3.b]

| Dígit | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---------------------------|-------------------------------------|---|--|--|---|--|
| Descriptor | Base de la via | Rugositat del carril | Tipus de placa d'assentament | Mesures addicionals | Juntes dels carrils | Curvatura |
| Explicació del descriptor | Tipus de base de la via | Indicadors de la rugositat | Representa una indicació de la rigidesa acústica | Una lletra que descriu el dispositiu acústic | Presència de juntes i separacions | Indica el radi de curvatura en m |
| Codis permesos | B Balast | E Bona conservació i bon funcionament | S Suau (150-250 MN/m) | N Cap | N Cap | N Via recta |
| | S Via en placa | M Conservació normal | M Mitjana (250 a 800 MN/m) | D Amortidor del carril | S Canvi o junta únics | L Baixa (1.000-500 m) |
| | L Pont amb via amb balast | N Mala conservació | H Rígid (800-1.000 MN/m) | B Pantalla de baixa altura | D Dues juntes o canvis per 100 m | M Mitjana (Menys de 500 m i més de 300 m) |
| | N Pont sense balast | B Sense manteniment i en mal estat | | A Placa d'absorció acústica en la via en placa | M Més de dues juntes o canvis per 100 m | H Alta (Menys de 300 m) |
| | T Via embeguda | | | E Carril embegut | | |
| | O Altres | | | O Altres | | |

Nombre i situació de fonts sonores equivalents.

Figura [2.3.a]
Situació de fonts sonores equivalents



Les diferents fonts lineals de soroll equivalents s'ubiquen a diferents altures i al centre de la via. Totes les altures es refereixen al pla tangencial a les dues superfícies superiors dels dos carrils.

Les fonts equivalents comprenen diferents fonts físiques (índex p). Aquestes fonts físiques es divideixen en dues categories diferents en funció del mecanisme de generació, i són: 1) el soroll de rodolament (inclosa no tan sols la vibració de la base del carril i la via i la vibració de les rodes, sinó també, si escau, el soroll de la superestructura dels vehicles destinats al transport de mercaderies); 2) el soroll de tracció; 3) el soroll aerodinàmic; 4) el soroll d'impacte (en encreuaments, canvis i juntes); 5) el soroll generat pels xerrics, i 6) el soroll generat per efectes addicionals com ara ponts i viaductes.

- 1) El soroll de rodolament s'origina a causa de la rugositat de les rodes i dels caps del carril, a través de tres vies de transmissió a les superfícies radiant (carril, rodes i superestructura). La font s'ubica a $h = 0,5$ m (superfícies radiant A) per representar la contribució de la via, inclosos els efectes de la superfície de les vies, en particular en les vies en placa (segons la zona de propagació), per representar la contribució de la roda i la contribució de la superestructura del vehicle en relació amb el soroll (en el cas dels trens de mercaderies).
- 2) Les altures de les fonts equivalents per a la consideració del soroll de tracció varien entre 0,5 m (font A) i 4,0 m (font B), en funció de la posició física del component de què es tracti. Les fonts com ara les transmissions i els motors elèctrics normalment estan a una altura de l'eix de 0,5 m (font A). Les reixetes de ventilació i les sortides d'aire poden estar a diverses altures; el sistema d'escapament del motor en els vehicles dièsel sol estar a una altura de 4,0 m (font B). Altres fonts de tracció, com els ventiladors o els blocs motor dièsel, poden estar a una altura de 0,5 m (font A) o de 4,0 m (font B). Si l'altura exacta de la font està entre les altures del model, l'energia sonora s'ha de distribuir de manera proporcional sobre les altures de fonts adjacents més properes.

Per aquest motiu, es preveuen dues altures de fonts mitjançant el mètode a 0,5 m (font A), 4,0 m (font B), i la potència sonora equivalent associada es distribueix entre les dues en funció de la configuració específica de les fonts en el tipus d'unitat.

- 3) Els efectes del soroll aerodinàmic s'associen amb la font a 0,5 m (que representa les cobertes i les pantalles, font A) i la font a 4,0 m (modelització per aparells de sostre i pantògrafs, font B). L'opció de considerar una font a 4,0 m per als efectes del pantògraf constitueix un model molt senzill i s'ha de considerar detingudament si l'objectiu és triar una altura apropiada de la barrera acústica.
- 4) El soroll d'impacte s'associa amb la font a 0,5 m (font A).
- 5) El soroll dels xerrics s'associa amb les fonts a 0,5 m (font A).

6) El soroll d'impacte en ponts i viaductes s'associa amb la font a 0,5 m (font A).

2.3.2. Nivell de potència sonora. Emissió

Equacions generals.

Vehicle individual.

El model de soroll del trànsit ferroviari, de forma anàloga al soroll del trànsit viari, obté el nivell de la potència sonora d'una combinació específica de tipus de vehicle i tipus de via que satisfà una sèrie de requisits descrits en la classificació de vehicles i vies, partint d'un conjunt de nivells de potència sonora per a cada vehicle ($L_{W,0}$).

Intensitat de trànsit.

L'emissió de soroll originat per la circulació de trens en cada via s'ha de representar mitjançant un conjunt de dues fonts lineals caracteritzades pel seu nivell de potència sonora direccional per metre i per banda de freqüències. Això es correspon amb la suma de les emissions de soroll de cadascun dels vehicles que circulen i, en el cas específic dels vehicles aturats, es té en compte el temps que els vehicles passen en el tram ferroviari considerat.

El nivell de potència sonora direccional per metre i per banda de freqüències, a causa de tots els vehicles que circulen per cada tram de via d'un determinat tipus de via (j), es defineix de la manera següent:

— per a cada banda de freqüències (i);

— per a cada altura de font determinada (h) (per a les fonts a 0,5 m h = 1 i a 4,0 m h = 2).

I és la suma de l'energia de totes les contribucions de tots els vehicles que circulen pel tram de via específic j. Aquestes contribucions corresponen a:

— de tots els tipus de vehicles (t)

— a diferents velocitats (s)

— en condicions de circulació particulars (velocitat constant) (c)

— per a cada tipus de font física (rodolament, impacte, xerrics, tracció, aerodinàmica i fonts amb altres efectes, com ara el soroll dels ponts) (p).

Per calcular el nivell de potència sonora direccional per metre (dada d'entrada en la part de propagació) a causa del trànsit mixt en el tram de via j, s'utilitza l'expressió següent:

$$L_{W',eq,T,dir,i} = 10 \cdot \lg \left(\sum_{x=1}^X 10^{L_{W',eq,line,x}/10} \right) \quad (2.3.1)$$

on

T_{ref} = període de temps de referència per al qual es considera el trànsit mitjà

x = nombre total de combinacions existents de i, t, s, c, p per a cada tram de la via j

t = índex per als tipus de vehicle en el tram de via j

s = índex per a la velocitat del tren: hi ha tants índexs com nombre de velocitats mitjanes de circulació diferents en el tram de via j

c = índex per a les condicions de circulació: 1 (per a velocitat constant), 2 (ralenti)

p = índex per als tipus de fonts físiques: 1 (per a soroll de rodolament i d'impacte), 2 (xeric en els revolts), 3 (soroll de tracció), 4 (soroll aerodinàmic), 5 (altres efectes)

$L_{W',eq,line,x}$ = nivell de potència sonora direccional x per metre per a una font lineal d'una combinació de t, s, r, p en cada tram de via j

Si se suposa una intensitat de circulació constant de vehicles Q per hora, amb una velocitat mitjana v , com a mitjana en cada moment, hi ha d'haver un nombre equivalent de vehicles Q/v per unitat de longitud del tram de la via ferroviària. L'emissió de soroll a causa de la circulació de trens en termes de nivell de potència sonora direccional per metre $L_{W',eq,line}$ (expressada en dB/m (re. 10^{-12} W)) s'obté mitjançant l'expressió:

$$L_{W',eq,line,i}(\psi,\varphi) = L_{W,0,dir,i}(\psi,\varphi) + 10 \times \lg\left(\frac{Q}{1\,000v}\right) \text{ (per a } c = 1) \quad (2.3.2)$$

on

— Q és el nombre de vehicles per hora en el tram de via j per al tipus de vehicle t , amb una velocitat mitjana del tren s i unes condicions de circulació c

— v és la velocitat en el tram de via j per al tipus de vehicle t i amb una velocitat mitjana del tren s

— $L_{W,0,dir}$ és el nivell de potència sonora direccional del soroll específic (rodolament, impacte, xeric, frenada, tracció, aerodinàmic i altres efectes) d'un únic vehicle en les direccions ψ, φ definides respecte a la direcció en què es mou el vehicle (vegeu la figura [2.3.b]).

En el cas d'una font estacionària, com ara durant el ralenti, se suposa que el vehicle roman durant un temps total T_{idle} en una ubicació dins d'un tram de via amb una longitud L . Per tant, si T_{ref} és el període de temps de referència per a l'avaluació del soroll (per exemple, 12 hores, 4 hores o 8 hores), el nivell de potència sonora direccional per unitat de longitud en el tram de via es defineix mitjançant:

$$L_{W',eq,line,i}(\psi,\varphi) = L_{W,0,dir,i}(\psi,\varphi) + 10 \times \lg\left(\frac{T_{idle}}{T_{ref}L}\right) \text{ (per a } c = 2) \quad (2.3.4)$$

En general, el nivell de potència sonora direccional s'obté de cada font específica com:

$$L_{W,0,dir,i(\psi,\varphi)} = L_{W,0,i} + \Delta L_{W,dir,vert,i} + \Delta L_{W,dir,hor,i} \quad (2.3.5)$$

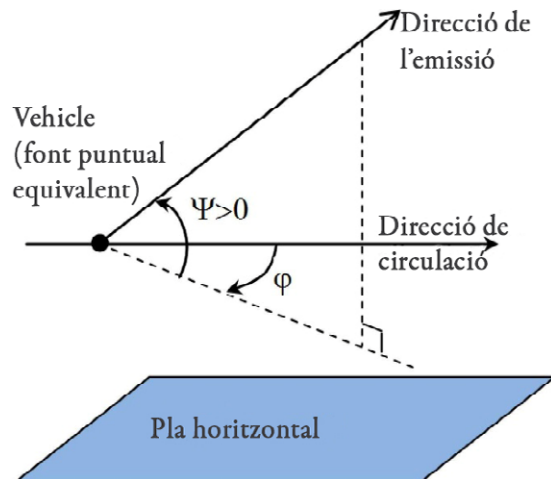
on

— $\Delta L_{W,dir,vert,i}$ és la funció de la correcció per directivitat vertical (adimensional) de ψ (figura [2.3.b])

— $\Delta L_{W,dir,hor,i}$ és la funció de la correcció per directivitat horitzontal (adimensional) de φ (figura [2.3.b]).

I on $L_{W,0,dir,i(\psi,\varphi)}$, després de trobar-se en bandes d'1/3 de vuitena, s'ha d'expressar en bandes de vuitena sumant enèrgicament les potències de cada banda d'1/3 de vuitena que integren la banda de vuitena corresponent.

Figura [2.3.b]
Definició geomètrica



Als efectes de càlcul, la potència de la font s'expressa de manera específica en termes de nivell de potència sonora direccional per una longitud d'1 m de la via $L_{W',tot,dir,i}$ per tenir en compte la directivitat de les fonts en la seva direcció vertical i horitzontal, mitjançant les correccions addicionals.

Es consideren diversos $L_{W,0,dir,i}(\psi, \phi)$ per a cada combinació de vehicle-via-velocitat-condicions de circulació:

- per a cada banda de freqüències de vuitena d'1/3 (**i**)
- per a cada tram de via (**j**)
- per a cada altura de la font (**h**) (per a fonts a 0,5 m $h = 1$, a 4,0 m $h = 2$)
- directivitat (**d**) de la font

Soroll de rodolament.

La contribució del vehicle i la contribució de la via al soroll de rodolament es divideixen en quatre elements bàsics: la rugositat de la roda, la rugositat del carril, la funció de transferència del vehicle a les rodes i a la superestructura i la funció de transferència de la via. La rugositat de les rodes i dels carrils representen la causa de l'excitació de la vibració del punt de contacte entre el carril i la roda, i les funcions de transferència són dues funcions empíriques o modelitzades que representen tot el fenomen complex de la vibració mecànica i de la generació de soroll en les superfícies de les rodes, el carril, la travessa i la subestructura de la via. Aquesta separació reflecteix l'evidència física que la rugositat del carril pot excitar la vibració d'aquest, però també excitarà la vibració de la roda, i viceversa. No incloure algun d'aquests quatre paràmetres impediria la dissociació de la classificació de les vies i els trens.

Rugositat de la roda i de la via.

El soroll de rodolament originat per la rugositat del carril i la roda correspon al rang de longitud d'ona comprès entre 5 i 500 mm.

Definició.

El nivell de rugositat L_r es defineix com 10 vegades el logaritme de base 10 del quadrat del valor quadràtic mitjà r^2 de la rugositat de la superfície de rodolament d'un carril o una roda en la direcció del moviment (nivell longitudinal) mesurada en μm respecte a una longitud determinada del carril o al diàmetre total de la roda, dividida entre el quadrat del valor de referència r_0^2 :

$$L_r = 10 \times \lg\left(\frac{r}{r_0}\right)^2 \text{ dB} \quad (2.3.6)$$

on

$r_0 = 1 \mu\text{m}$

r = RMS de la diferència de desplaçament vertical de la superfície de contacte respecte al nivell mitjà

El nivell de rugositat L_r se sol obtenir com una longitud d'ona λ i s'ha de convertir en una freqüència $f = v/\lambda$, on f és la freqüència de banda central d'una banda de vuitena determinada en Hz, λ és la longitud d'ona en m i v és la velocitat del tren en m/s. L'espectre de rugositat com una funció de freqüència canvia al llarg de l'eix de freqüència per a diferents velocitats. En casos generals, després de la conversió a l'espectre de freqüències en funció de la velocitat, és necessari obtenir nous valors de l'espectre de bandes de vuitena d'1/3 fent la mitjana entre dues bandes d'1/3 de vuitena corresponents en el domini de la longitud d'ona. Per calcular l'espectre de freqüències de la rugositat efectiva total corresponent a la velocitat apropiada del tren, s'ha de calcular la mitjana energètica i proporcional de les dues bandes d'1/3 de vuitena corresponents definides en el domini de la longitud d'ona.

El nivell de rugositat del carril per a la banda de longitud d'ona i es defineix com $L_{r,TR,i}$

Per analogia, **el nivell de rugositat de la roda** per a la banda de longitud d'ona i es defineix com $L_{r,VEH,i}$.

El nivell de rugositat efectiva total per a la banda de longitud d'ona i ($L_{R,tot,i}$) es defineix com la suma energètica dels nivells de rugositat del carril i de la roda més el filtre de contacte $A_3(\lambda)$ per tenir en compte l'efecte de filtració de la banda de contacte entre el carril i la roda, i es mesura en dB:

$$L_{R,TOT,i} = 10 \cdot \lg(10^{L_{r,TR,i}/10} + 10^{L_{r,VEH,i}/10}) + A_{3,i} \quad (2.3.7)$$

on s'expressa com una funció de la banda del nombre d'ona i corresponent a la longitud d'ona λ .

El filtre de contacte depèn del tipus de carril i de roda i de la càrrega.

En el mètode s'ha d'utilitzar la rugositat efectiva total del tram de via j per a cada tipus de vehicle t a la seva velocitat v corresponent.

Funció de transferència de vehicle, via i superestructura.

Les funcions de transferència independents de la velocitat $L_{H,TR,i}$, $L_{H,VEH,i}$ i $L_{H,VEH,SUP,i}$ es defineixen per a cada tram de via j i per a cada tipus de vehicle t . Relacionen el nivell de rugositat efectiva total amb la potència sonora de la via, les rodes i la superestructura, respectivament.

La contribució de la superestructura es considera només per als vagons de mercaderies, per tant, només per al tipus de vehicles «o».

En el cas del soroll de rodolament, les contribucions de la via i del vehicle es descriuen totalment mitjançant les funcions de transferència i mitjançant el nivell de rugositat efectiva total. Quan un tren està en ralenti, el soroll de rodolament queda exclòs.

Per a l'obtenció del nivell de potència sonora per vehicle, el soroll de rodolament es calcula a l'altura de l'eix i , com a dada d'entrada, té el nivell de rugositat efectiva total $L_{R,TOT,i}$, que és una funció de la velocitat del vehicle v , les funcions de transferència de la via, el vehicle i la superestructura $L_{H,TR,i}$, $L_{H,VEH,i}$ i $L_{H,VEH,SUP,i}$, i el nombre total d'eixos N_a :

per a $h = 1$:

$$L_{W,0,TR,i} = L_{R,TOT,i} + L_{H,TR,i} + 10 \times \lg(N_a) \quad \text{dB} \quad (2.3.)$$

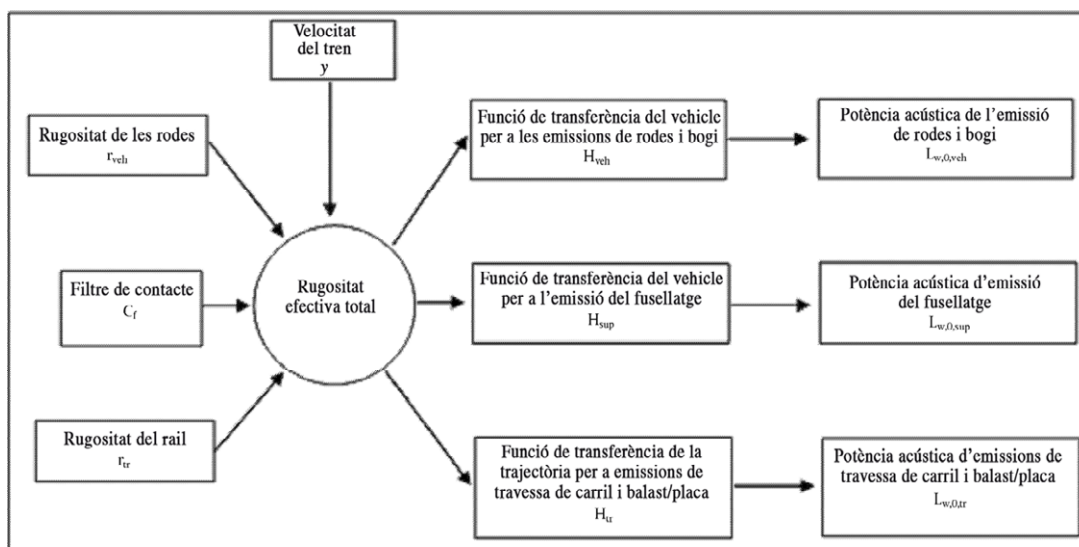
$$L_{W,0,VEH,i} = L_{R,TOT,i} + L_{H,VEH,i} + 10 \times \lg(N_a) \quad \text{dB} \quad (2.3.)$$

$$L_{W,0,VEHSUP,i} = L_{R,TOT,i} + L_{H,VEHSUP,i} + 10 \times \lg(N_a) \quad \text{dB} \quad (2.3.1)$$

on N_a és el nombre d'eixos per vehicle per al tipus de vehicle t.

Figura [2.3.c]

Esquema d'ús de les diferents definicions de rugositat i funció de transferència



S'ha d'utilitzar una velocitat mínima de 50 km/h (30 km/h per als tramvies i el metro) per determinar la rugositat efectiva total i, per consegüent, el nivell de potència sonora dels vehicles (aquesta velocitat no afecta el càlcul de les circulacions de vehicles) per compensar l'error potencial introduït per la simplificació de la definició del soroll de rodolament, el soroll dels frens i el soroll d'impacte generat en les interseccions i els canvis.

Soroll d'impacte (encreuaments, canvis i juntes).

El soroll d'impacte es pot produir en els encreuaments, els canvis i les juntes o les agulles. Pot variar en magnitud i pot ser dominant en relació amb el soroll de rodolament. El soroll d'impacte s'ha de considerar per a les vies amb juntes. No s'ha de considerar el soroll d'impacte generat per canvis, encreuaments i juntes en els trams de via amb una velocitat inferior a 50 km/h (30 km/h per a tramvies i metros), ja que la velocitat mínima de 50 km/h (30 km/h només per a tramvies i metros) s'utilitza per incloure més efectes d'acord amb la descripció que preveu el capítol del soroll de rodolament. La modelització del soroll d'impacte tampoc s'ha de considerar en condicions de circulació $c = 2$ (ralenti).

El soroll d'impacte s'inclou en el terme del soroll de rodolament quan s'afegeix (energèticament) un nivell de rugositat de l'impacte fictici suplementari al nivell de rugositat efectiva total en cada tram de via j quan sigui pertinent. En aquest cas, s'ha d'utilitzar una nova funció $L_{R,TOT+IMPACT,i}$ en lloc de $L_{R,TOT,i}$, de manera que queda com s'indica a continuació:

$$L_{R,TOT+IMPACT,i} = 10 \times \lg(10^{L_{R,TOT,i}/10} + 10^{L_{R,IMPACT,i}/10}) \quad \text{dB} \quad (2.3.11)$$

$L_{R,IMPACT,i}$ és una funció de la freqüència considerada en bandes d'1/3 vuitena. Per obtenir aquest espectre de freqüències, el mètode inclou un espectre en funció de la longitud d'ona λ i s'ha de convertir en freqüències utilitzant la relació $\lambda = v/f$, on f és la freqüència central de la banda d'1/3 de vuitena en Hz i v és la velocitat s del vehicle tipus t en m/s.

El soroll d'impacte depèn de la gravetat i el nombre d'impactes per unitat de longitud, de manera que en cas que es donin diversos impactes, el nivell de rugositat de l'impacte que s'ha d'utilitzar en l'equació anterior es calcula de la manera següent:

$$L_{R,IMPACT,i} = L_{R,IMPACT-SINGLE,i} + 10 \times \lg\left(\frac{n_i}{0,01}\right) \quad \text{dB} \quad (2.3.12)$$

on

$L_{R,IMPACT-SINGLE,i}$ és el nivell de rugositat de l'impacte que es proporciona per a un únic impacte i n_i és el nombre d'unions per unitat de longitud.

El nivell de rugositat de l'impacte de referència es facilita per a un nombre d'unions per unitat de longitud de $n_i = 0,01 \text{ m}^{-1}$, que és una unió per cada 100 m de via. Les situacions amb un nombre diferent s d'unions es consideren mitjançant el factor de correcció n_i . Cal assenyalar que, quan es modelitza la segmentació de la via, s'ha de tenir en compte el nombre d'unions del carril, és a dir, que pot ser necessari considerar segments de línia font separats per a un tram de via amb més unions. La $L_{W,0}$ de la via, la roda i el bogi i la contribució de la superestructura s'incrementen en $L_{R,IMPACT,i}$ per a 50 m abans i després de la unió del carril. Si es tracta d'una sèrie d'unions, l'increment s'estén a un interval comprès entre -50 m abans de la primera unió i +50 m després de l'última unió.

L'aplicabilitat d'aquests espectres de potència sonora, per norma general, s'ha de verificar «in situ».

Com a valor per defecte, s'ha d'utilitzar $n_i = 0,01$.

Xerrics.

El xerric en els revolts és una font especial que només és rellevant per als revolts i, per tant, està localitzat. Com que pot ser significatiu, se'n necessita una descripció apropiada. El xerric en revolts sol dependre de la curvatura, de les condicions de fricció, de la velocitat del tren i de la dinàmica i la geometria de les rodes i la via. El nivell d'emissions que s'ha d'utilitzar es determina per als revolts amb un radi inferior o igual a 500 m i per a revolts més tancats i desviaments amb un radi inferior a 300 m. L'emissió de soroll ha de ser específica de cada tipus de material de rodolament, ja que determinats tipus de rodes i bogis poden ser molt menys propensos als xerrics que d'altres.

L'aplicabilitat d'aquests espectres de potència sonora, per norma general, s'ha de verificar «in situ», en particular en el cas dels tramvies.

Adoptant un enfocament senzill, s'ha de considerar el soroll dels xerrics afegint 8 dB per a $R < 300 \text{ m}$ i 5 dB per a $300 \text{ m} < R < 500 \text{ m}$ a l'espectre de potència sonora del soroll de rodolament per a totes les freqüències. La contribució del xerric s'ha d'aplicar als trams de vies ferroviàries en què el radi estigui dins dels rangs esmentats anteriorment almenys durant 50 m de longitud de la via.

Soroll de tracció.

Encara que el soroll de tracció sol ser específic de cada condició de funcionament característica de velocitat constant, desacceleració, acceleració i ralenti, les úniques dues condicions modelitzades són la velocitat constant (que és vàlida també quan el tren està desaccelerant o quan està accelerant) i el ralenti. La potència de la font considerada només es correspon amb les condicions de càrrega màxima, i això implica que $L_{W,0,const,i} = L_{W,0,idling,i}$. A més, $L_{W,0,idling,i}$ es correspon amb la contribució de totes les fonts físiques d'un vehicle determinat atribuïble a una altura específica, com descriu la secció 2.3.1.

$L_{W,0,idling,i}$ s'expressa com una font sonora estàtica en la posició de ralenti, per a la durada de l'estat de ralenti, que es modelitza com una font puntual fixa, segons es descriu en el capítol següent dedicat al soroll industrial. Només s'ha de considerar si els trens estan en ralenti durant més de 0,5 hores.

Aquests valors es poden obtenir mitjançant mesuraments de totes les fonts en cada estat de funcionament, o bé les fonts parcials es poden caracteritzar separatament, per determinar la dependència que tenen dels paràmetres i la seva força relativa. Això es pot calcular mitjançant el mesurament d'un vehicle estacionari, variant les velocitats

de rotació de l'equip de tracció, de conformitat amb la norma ISO 3095:2005. Si és pertinent, s'han de caracteritzar diverses fonts sonores de tracció, i és possible que no totes depenguin de la velocitat del tren:

- El soroll del motor, com els motors dièsel (incloses les entrades d'aire, el sistema d'escapament i el bloc motor), la transmissió, els generadors elèctrics, que depenen en gran mesura de les revolucions per minut (rpm), i les fonts elèctriques, com els convertidors, que poden dependre significativament de la càrrega.
- El soroll dels ventiladors i dels sistemes de refrigeració, en funció de les rpm del ventilador; en alguns casos, els ventiladors poden estar directament acoblats a la transmissió.
- Fonts intermitents com els compressors, les vàlvules i d'altres amb una durada característica de funcionament i la correcció corresponent del cicle de funcionament per a l'emissió de soroll.

Tenint en compte que aquestes fonts es poden comportar de manera diferent en cada estat de funcionament, el soroll de la tracció s'ha d'especificar segons correspongui. La intensitat d'una font s'obté de mesuraments efectuats en condicions controlades. En general, les locomotores tendeixen a mostrar més variació en la càrrega en funció del nombre de vehicles remolcats i, per consegüent, la potència resultant pot variar significativament, mentre que les composicions de trens, com les unitats motoritzades elèctriques, les unitats motoritzades dièsel i els trens d'alta velocitat, tenen una càrrega més ben definida.

No hi ha una atribució «a priori» de la potència sonora de la font a determinades altures de la font, i aquesta elecció depèn del soroll específic i el vehicle avaluats. S'ha de modelitzar com una font A ($h = 1$) i una font B ($h = 2$).

Soroll aerodinàmic.

El soroll aerodinàmic només es té en compte a altes velocitats per sobre de 200 km/h, per la qual cosa s'ha de verificar si és realment necessari als efectes d'aplicació. Si es coneixen les funcions de transferència i rugositat del soroll de rodolament, es poden extrapolar a velocitats més altes i es pot efectuar una comparació amb les dades existents per a l'alta velocitat per comprovar si el soroll aerodinàmic genera nivells més alts. Si les velocitats del tren en una xarxa ferroviària són superiors a 200 km/h, però estan limitades a 250 km/h, en alguns casos pot no ser necessari incloure el soroll aerodinàmic, depenent del disseny del vehicle.

La contribució del soroll aerodinàmic es facilita com una funció de velocitat:

$$L_{W,0,i} = L_{W,0,1,i}(v_0) + \alpha_{1,i} \times \lg\left(\frac{v}{v_0}\right) \quad \text{dB} \quad \text{Per a } h = 1 \quad (2.3.13)$$

$$L_{W,0,i} = L_{W,0,2,i}(v_0) + \alpha_{2,i} \times \lg\left(\frac{v}{v_0}\right) \quad \text{dB} \quad \text{Per a } h = 2 \quad (2.3.14)$$

on

v_0 en una velocitat en què el soroll aerodinàmic és dominant i es calcula a 300 km/h

$L_{W,0,1,i}$ és un nivell de potència sonora de referència determinada per dos o més punts de mesura, per a fonts a altures de fonts conegudes, per exemple, el primer bogi

$L_{W,0,2,i}$ és un nivell de potència sonora de referència determinada per dos o més punts de mesura, per a fonts a altures de fonts conegudes, per exemple, les altures de contacte del pantògraf

$\alpha_{1,i}$ és un coeficient determinat per dos o més punts de mesura, per a fonts a altures de fonts conegudes, per exemple, el primer bogi

$\alpha_{2,i}$ és un coeficient determinat per dos o més punts de mesura, per a fonts a altures de fonts conegudes, per exemple, les altures de contacte del pantògraf

Directivitat de la font.

La directivitat horitzontal $\Delta L_{W,dir,hor,i}$ en dB per defecte en el pla horitzontal i, per defecte, es pot assumir que es tracta d'un dipol per als efectes de rodolament, impacte (juntes de carril, etc.), xerrics, frens, ventiladors i aerodinàmic, que es calcula per a cada banda de freqüències i mitjançant:

$$\Delta L_{W,dir,hor,i} = 10 \times \lg(0,01 + 0,99 \cdot \sin^2\varphi) \quad (2.3.15)$$

La directivitat vertical $\Delta L_{W,dir,ver,i}$ en dB es calcula en el pla vertical per a la font A ($h = 1$), com una funció de la freqüència central $f_{c,i}$ de cada banda de freqüències i, i per a $-\pi/2 < \psi < \pi/2$:

$$\Delta L_{W,dir,ver,i} = \left(\left[\frac{40}{3} \times \left[\frac{2}{3} \times \sin(2 \cdot \psi) - \sin\psi \right] \times \lg \left[\frac{f_{c,i} + 600}{200} \right] \right] \right) \quad (2.3.16)$$

Per a la font B ($h = 2$) per a l'efecte aerodinàmic:

$$\Delta L_{W,dir,ver,i} = 10 \times \lg(\cos^2\psi) \quad \text{per a } \psi < 0 \quad (2.3.17)$$

$\Delta L_{W,dir,ver,i} = 0$ en tots els altres casos.

La directivitat $\Delta L_{dir,ver,i}$ no es té en compte per a la font B ($h = 2$) per als altres, ja que se suposa l'omnidireccionalitat per a les fonts situades en aquesta posició.

2.3.3. Altres efectes.

Correcció per la radiació estructural (ponts i viaductes).

En cas que el tram de via es trobi en un pont, és necessari tenir en compte el soroll addicional generat per la vibració del pont com a resultat de l'excitació ocasionada per la presència del tren. Tenint en compte que no és fàcil modelitzar l'emissió de soroll del pont com una font addicional, a causa de les formes tan complexes dels ponts, es considera un augment del soroll de rodolament per representar el soroll del pont. L'augment s'ha de modelitzar exclusivament incorporant un augment fix de la potència sonora per a cada banda de terç de vuitena. Per tenir en compte aquesta correcció es modifica energèticament el nivell de potència sonora del soroll de rodolament, i s'ha d'utilitzar el nou $L_{W,0,rolling\text{-and-bridge},i}$ en lloc de $L_{W,0,rolling\text{-only},i}$:

$$L_{W,0,rolling\text{-and-bridge},i} = L_{W,0,rolling\text{-only},i} + C_{bridge} \quad \text{dB} \quad (2.3.18)$$

on C_{bridge} és una constant que depèn del tipus de pont, i $L_{W,0,rolling\text{-only},i}$ és el nivell de potència sonora de rodolament en el pont de què es tracti que depèn només de les propietats del vehicle i de la via.

Correcció per a altres fonts sonores ferroviàries.

Poden existir altres fonts, com els dipòsits, les zones de càrrega i descàrrega, les estacions, les campanes, la megafonia de l'estació, etc., i que s'associen amb el soroll ferroviari. Aquestes fonts s'han de tractar com a fonts sonores industrials (fonts sonores fixes) i s'han de modelitzar, si escau, segons el que exposa el capítol següent dedicat al soroll industrial.

2.4. Soroll industrial

2.4.1. Descripció de la font.

Classificació dels tipus de font (punt, línia i àrea).

Les fonts industrials presenten dimensions molt variables. Es pot tractar de plantes industrials grans, així com de fonts concentrades petites, com ara eines petites o màquines operatives utilitzades en fàbriques. Per tant, és necessari utilitzar una tècnica de modelització apropiada per a la font específica objecte d'avaluació. En funció de les dimensions i de la manera com diverses fonts independents s'estenen per una zona, totes pertanyents al mateix emplaçament industrial, es poden modelitzar com a fonts puntuals, fonts lineals o altres fonts del tipus àrea. En la pràctica, els càlculs de l'efecte acústic sempre es basen en les fonts sonores puntuals, però es poden utilitzar diverses fonts sonores puntuals per representar una font complexa real, que s'estén principalment per una línia o una àrea.

Nombre i situació de fonts sonores equivalents.

Les fonts sonores reals es modelitzen mitjançant fonts sonores equivalents representades per una o diverses fonts puntuals, de manera que la potència sonora total de la font real es correspongui amb la suma de les potències sonores individuals atribuïdes a les diferents fonts puntuals.

Les normes generals que s'han d'aplicar en la definició del nombre de fonts puntuals que s'utilitzin són:

- Les fonts lineals o de tipus àrea en què la dimensió superior és inferior a 1/2 de la distància entre la font i el receptor es poden modelitzar com a fonts puntuals exclusives.
- Les fonts en què la dimensió més gran és superior a 1/2 de la distància entre la font i el receptor s'han de modelitzar com una sèrie de fonts puntuals en una línia o com una sèrie de fonts puntuals incoherents en una àrea, de manera que per a cadascuna d'aquestes fonts es compleixi la condició de distància estable. La distribució per una àrea pot incloure la distribució vertical de les fonts puntuals.
- Si es tracta de fonts en què les dimensions més grans en termes d'altura superin els 2 m o si són a prop del sòl, cal prestar especial atenció a l'altura de la font. Duplicar el nombre de fonts, redistribuint-les únicament en la component z, no pot oferir un resultat significativament millor per a aquesta font.
- Per a totes les fonts, duplicar el nombre de fonts sobre l'àrea de la font (en totes les dimensions) no pot oferir un resultat significativament millor.

No es pot fixar per endavant la posició de les fonts sonores equivalents, a causa del gran nombre de configuracions que un emplaçament industrial pot tenir. En general, s'apliquen bones pràctiques.

Nivell de potència sonora. Emissió.

Consideracions generals.

La informació següent constitueix el conjunt complet de dades d'entrada necessàries per als càlculs de la propagació sonora amb els mètodes que s'utilitzen per a la cartografia de soroll:

- Espectre del nivell de potència sonora emesa en bandes de vuitena
- Hores de funcionament (dia, tarda, nit o com a mitjana anual)
- Ubicació (coordenades x, y) i elevació (z) de la font de soroll
- Tipus de font (punt, línia i àrea)
- Dimensions i orientació
- Condicions de funcionament de la font
- Directivitat de la font.

És necessari definir el nivell de potència sonora de la font puntual, lineal o d'àrea com:

- Per a una font puntual el nivell de potència sonora L_W i la directivitat com una funció de tres coordenades ortogonals (x, y, z);
- Es poden definir dos tipus de fonts lineals:
 - Per a fonts lineals que representen cintes transportadores, oleoductes, etc., el nivell de potència sonora per longitud en metres L_W i directivitat com una funció de dues coordenades ortogonals en l'eix de la línia de la font;
 - Per a fonts lineals que representen els vehicles en moviment, cadascun d'aquests associat al nivell de potència sonora L_W i directivitat com una funció de les dues coordenades ortogonals en l'eix de la font lineal i nivell de potència sonora per metre L_W considerant la velocitat i el nombre de vehicles que circulen per aquesta línia durant el dia, la tarda i la nit. La correcció per a les hores de funcionament, que s'afegeix al nivell de potència

sonora de la font per definir el nivell de potència sonora corregit que s'ha d'utilitzar per als càlculs en cada període de temps C_w en dB, es calcula de la manera següent:

$$C_w = -10 \lg \left(\frac{l \times n}{1\,000 \times V \times T_0} \right) \quad (2.4.1)$$

On:

- V Velocitat del vehicle [km/h];
- N Nombre de circulacions de vehicles per cada període [-];
- l Longitud total de la font [m];

— Per a una font del tipus àrea, el nivell de potència sonora per metre quadrat L_{w/m^2} , i sense directivitat (pot ser horitzontal o vertical).

Les hores de funcionament són una informació fonamental per al càlcul dels nivells de soroll. Les hores de funcionament s'han de facilitar per al dia, la tarda i la nit i, si la propagació utilitza diferents classes meteorològiques definides durant el dia, la nit i la tarda, llavors s'ha de facilitar una distribució més definida de les hores de funcionament en subperíodes que coincideixin amb la distribució de les classes meteorològiques. Aquesta informació es basa en una mitjana anual.

La correcció de les hores de funcionament, que s'afegeix al nivell de potència sonora de la font per definir el nivell de potència sonora corregida que s'ha d'utilitzar per als càlculs en relació amb cada període de temps C_w en dB, es calcula de la manera següent:

$$C_w = 10 \times \lg \left(\frac{T}{T_{ref}} \right) \quad (2.4.2)$$

on

T és el temps que la font està activa per cada període amb caràcter anual, mesurat en hores;

T_{ref} és el període de temps de referència en hores (per exemple, per al dia és 12 hores, per a la tarda, 4 hores i, per a la nit, 8 hores).

Per a les fonts més dominants, la correcció de les hores de funcionament mitjà anual s'ha de calcular almenys en una tolerància de 0,5 dB a fi d'aconseguir una precisió acceptable (és equivalent a una incertesa inferior al 10% en la definició del període durant el qual la font roman activa).

Directivitat de la font.

La directivitat de la font està estretament relacionada amb la posició de la font sonora equivalent propera a les superfícies pròximes. Com que el mètode de propagació té en compte la superfície pròxima i l'absorció sonora, és necessari tenir en compte detingudament la ubicació de les superfícies pròximes. En general, s'estableix una distinció entre aquests dos casos:

- Es considera un nivell de potència sonora i una directivitat obtinguts a partir d'una situació real d'una determinada font quan aquesta es troba a l'aire lliure (exclòs l'efecte del terreny). Això està en consonància amb les definicions establertes per a la propagació, sempre que se suposi que no hi ha cap superfície pròxima a menys de 0,01 m de la font i si s'inclouen les superfícies a 0,01 m o més en el càlcul de la propagació;
- Es considera un nivell de potència sonora i una directivitat obtinguts a partir d'una situació real d'una determinada font quan aquesta se situa en una ubicació específica i, per tant, el nivell de potència sonora de la font i la directivitat són «equivalents als de la font real», ja que inclou la modelització de l'efecte de les

superfícies pròximes. Es defineix en el «camp semilliu», en funció de les definicions establertes per a la propagació. En aquest cas, les superfícies pròximes modelitzades s'han d'excloure del càlcul de la propagació.

La directivitat s'expressa en el càlcul com un factor $\Delta L_{W,dir,xyz}(x, y, z)$ que s'afegeix al nivell de potència sonora per obtenir el nivell de potència sonora direccional correcte de la font sonora de referència observada des de la direcció corresponent. El factor es pot calcular com una funció del vector de direcció definit mitjançant (x,y,z) amb

$$\sqrt{x^2 + y^2 + z^2} = 1$$

Aquesta directivitat també es pot expressar mitjançant altres sistemes de coordenades, com els sistemes de coordenades angulars.

2.5. Càlcul de la propagació del soroll per a fonts viàries, ferroviàries i industrials

2.5.1. Abast i aplicabilitat del mètode.

En aquest document s'especifica un mètode per calcular l'atenuació del soroll durant la seva propagació en exteriors. Coneixent les característiques de la font, aquest mètode prediu el nivell de pressió sonora continu equivalent en un punt receptor corresponent a dos tipus particulars de condicions atmosfèriques:

- condicions de propagació per refracció descendent (gradient vertical positiu de la velocitat sonora efectiva) des de la font al receptor;
- condicions atmosfèriques homogènies (gradient vertical nul de velocitat sonora efectiva) respecte a l'àrea completa de propagació.

El mètode de càlcul descrit en aquest document s'aplica a les infraestructures industrials i a les infraestructures de transport terrestre. Per tant, s'aplica en particular a les infraestructures viàries i ferroviàries. El transport aeri s'inclou en l'àmbit d'aplicació del mètode de propagació només en el cas del soroll generat durant les operacions en terra i exclou l'enlairament i l'aterratge.

Les infraestructures industrials que emeten sorolls tonals forts o impulsius, segons descriu la norma ISO 1996-2:2007, no recauen dins de l'àmbit d'aplicació d'aquest mètode.

El mètode de càlcul no facilita resultats per a condicions de propagació per refracció ascendent (gradient vertical negatiu de velocitat sonora efectiva), de manera que per a aquestes condicions s'utilitzen les condicions homogènies quan es calcula L_{den} .

Per calcular l'atenuació deguda a l'absorció atmosfèrica en el cas d'infraestructures de transports, les condicions de temperatura i humitat, s'aplica la norma ISO 9613-1:1996.

El mètode ofereix resultats per banda de vuitena, des de 63 Hz fins a 8.000 Hz. Els càlculs s'efectuen per a cadascuna de les freqüències centrals.

Les cobertes parcials i els obstacles inclinats amb més de 15° d'inclinació en relació amb la vertical estan fora de l'àmbit d'aplicació d'aquest mètode de càlcul.

Una pantalla individual es calcula com a únic càlcul de difracció individual, dues o més pantalles en el mateix camí de propagació es tracten com un conjunt posterior de difraccions individuals mitjançant l'aplicació del procediment que es descriu més endavant.

2.5.2. Definicions utilitzades.

Totes les distàncies, altures, dimensions i altures utilitzades en aquest document s'expressen en metres (m).

La notació MN representa la distància en 3 dimensions (3D) entre els punts M i N, mesurada amb una línia recta que uneix aquests punts.

La notació \widehat{MN} representa la longitud de la trajectòria corba entre els punts M i N, en condicions favorables.

És habitual mesurar les altures reals en vertical en una direcció perpendicular al pla horitzontal. Les altures dels punts per damunt del terreny local es representen amb la h, mentre que les altures absolutes dels punts i l'altura absoluta del terreny s'han de representar amb la lletra H.

Per tenir en compte l'orografia real del terreny al llarg de la trajectòria de propagació, s'introdueix la noció d'«altura equivalent», que es representa amb la lletra z. Això substitueix les altures reals en les equacions de l'efecte de sòl.

Els nivells de pressió sonora, representats per la lletra majúscula L, s'expressen en decibels (dB) per banda de freqüències quan s'omet l'índex A. Als nivells de pressió sonora en decibels dB(A) se'ls assigna l'índex A.

La suma dels nivells de pressió sonora de fonts mútuament incoherents es representa mitjançant el signe \oplus en virtut de la definició següent:

$$L_1 \oplus L_2 = 10 \cdot \lg \left[10^{L_1/10} + 10^{L_2/10} \right] \quad (2.5.1)$$

2.5.3. Consideracions geomètriques.

Segmentació de la font.

Les fonts reals es descriuen mitjançant un conjunt de fonts puntuals o, en el cas del trànsit ferroviari o del trànsit viari, mitjançant fonts lineals incoherents. El mètode de propagació suposa que les fonts lineals o les fonts del tipus àrea s'han dividit prèviament per representar-se mitjançant una sèrie de fonts puntuals equivalents. Es poden obtenir mitjançant un processament previ de les dades de la font, o bé es poden generar informàticament mitjançant un cercador de trajectòries de propagació d'un programari de càlcul. Els mètodes d'obtenció estan fora de l'àmbit d'aplicació de la metodologia actual.

Trajectòries de propagació.

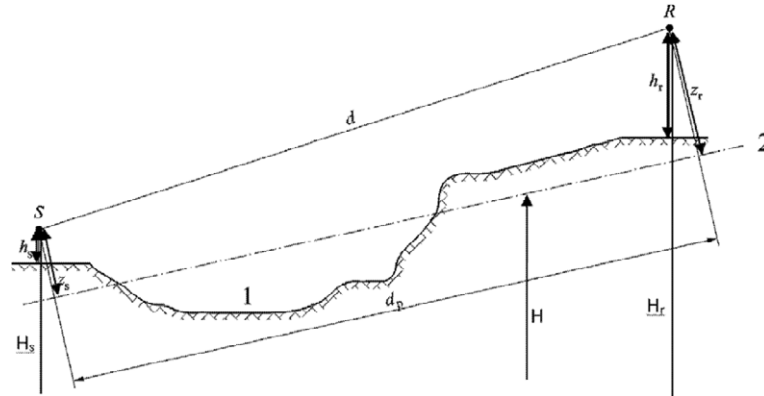
El mètode funciona en un model geomètric compost per un conjunt de superfícies d'obstacles i de sòl connectades. Una trajectòria de propagació vertical es desplega sobre un o diversos plans verticals respecte al pla horitzontal. Per a trajectòries que inclouen reflexions sobre les superfícies verticals no ortogonals en el pla incident, es considera posteriorment un altre pla vertical que inclou el tram reflectit de la trajectòria de propagació. En aquests casos, quan s'utilitzen més plans verticals per descriure la trajectòria completa des de la font fins al receptor, s'anivellen els plans verticals, com una pantalla xinesa desplegable.

Altres significatives per damunt del sòl.

Les altures equivalents s'obtenen en el pla mitjà del sòl entre la font i el receptor. Se substitueix el pla real per un pla fictici que representa el perfil mitjà del terreny.

Figura 2.5.a

Altures equivalents en relació amb el sòl



1: Orografia real

2: Pla mitjà

L'altura equivalent d'un punt és la seva altura ortogonal en relació amb el pla mitjà del sòl. Per tant, es poden definir l'altura de la font equivalent z_s i l'altura del receptor equivalent z_r . La distància entre la font i el receptor en projecció sobre el pla mitjà del sòl es representa amb d_p .

Si l'altura equivalent d'un punt resulta negativa, és a dir, si el punt està ubicat per sota del pla mitjà del sòl, es manté una altura nul·la, i el punt equivalent és idèntic a la seva possible imatge.

Càlcul del pla mitjà.

En el pla de la trajectòria de propagació, la topografia (inclosos el terreny, els monticles, els terraplens i altres obstacles artificials, els edificis, etc.) es pot descriure mitjançant un conjunt ordenat de punts discrets (x_k, H_k) ; $k \in \{1, \dots, n\}$. Aquest conjunt de punts defineix una polilínia o , de manera equivalent, una seqüència de segments rectes $H_k = a_k x + b_k$, $x \in [x_k, x_{k+1}]$; $k \in \{1, \dots, n\}$, on:

$$\begin{cases} a_k = (H_{k+1} - H_k)/(x_{k+1} - x_k) \\ b_k = (H_k \cdot x_{k+1} - H_{k+1} \cdot x_k)/(x_{k+1} - x_k) \end{cases} \quad (2.5.2)$$

El pla mitjà es representa mitjançant la línia recta $Z = ax + b$; $x \in [x_1, x_n]$, que s'ajusta a la polilínia mitjançant una aproximació mínima quadràtica. L'equació de la línia mitjana es pot calcular de forma analítica.

Per a això, s'utilitza:

$$\begin{cases} A = \frac{2}{3} \sum_{k=1}^{n-1} a_k (x_{k+1}^3 - x_k^3) + \sum_{k=1}^{n-1} b_k (x_{k+1}^2 - x_k^2) \\ B = \sum_{k=1}^{n-1} a_k (x_{k+1}^2 - x_k^2) + 2 \sum_{k=1}^{n-1} b_k (x_{k+1} - x_k) \end{cases} \quad (2.5.3)$$

Els coeficients de la línia recta s'obtenen mitjançant:

$$\begin{cases} a = \frac{3(2A - B(x_n + x_1))}{(x_n - x_1)^3} \\ b = \frac{2(x_n^3 - x_1^3)}{(x_n - x_1)^4} B - \frac{3(x_n + x_1)}{(x_n - x_1)^3} A \end{cases} \quad (2.5.4)$$

On els segments amb $x_k + 1 = x_k$ s'han d'ignorar quan s'avalua l'equació 2.5.3.

Reflexions per façanes d'edificis i altres obstacles verticals.

Les contribucions de les reflexions es tenen en compte mitjançant la introducció de fonts d'imatges tal com es descriu més endavant.

2.5.4. Model de propagació sonora.

Per a un receptor R, els càlculs s'efectuen seguint aquests passos:

1) per a cada trajectòria de propagació:

- càlcul de l'atenuació en condicions favorables;
- càlcul de l'atenuació en condicions homogènies;
- càlcul del nivell de pressió sonora a llarg termini per a cada trajectòria de propagació;

2) acumulació dels nivells de pressió sonora a llarg termini per a totes les trajectòries de propagació que afecten un receptor determinat, de manera que es permeti el càlcul del nivell de soroll total en el punt receptor.

Cal destacar que només les atenuacions degudes a l'efecte sòl (A_{ground}) i a la difracció (A_{dir}) es veuen afectades per les condicions meteorològiques.

2.5.5. Procés de càlcul.

Per a una font puntual S de nivell de potència sonora direccional $L_{w,0,\text{dir}}$ i per a una banda de freqüències determinada, el nivell de pressió sonora contínua equivalent en el punt receptor R en condicions atmosfèriques concretes s'obté amb les equacions següents.

Nivell de pressió sonora contínua equivalent en condicions favorables (LF) per a una trajectòria de propagació (S,R).

$$L_F = L_{w,0,\text{dir}} - A_F \quad (2.5.5)$$

El terme A_F representa l'atenuació total al llarg de la trajectòria de propagació en condicions favorables, i es desglossa de la manera següent:

$$A_F = A_{\text{div}} + A_{\text{atm}} + A_{\text{boundary},F} \quad (2.5.6)$$

on

A_{div} és l'atenuació per divergència geomètrica;

A_{atm} és l'atenuació per absorció atmosfèrica;

$A_{\text{boundary,F}}$ és l'atenuació pel límit del medi de propagació en condicions favorables. Pot contenir els termes següents:

$A_{\text{ground,F}}$, que és l'atenuació pel terreny en condicions favorables;

$A_{\text{dif,F}}$, que és l'atenuació per la difracció en condicions favorables.

Per a una trajectòria de propagació i una banda de freqüències determinades, es poden donar els dos escenaris següents:

— $A_{\text{ground,F}}$ es calcula sense difracció ($A_{\text{dif,F}} = 0$ dB) i $A_{\text{boundary,F}} = A_{\text{ground,F}}$;

— o bé es calcula $A_{\text{dif,F}}$. L'efecte sòl es té en compte en la mateixa equació $A_{\text{dif,F}}$ ($A_{\text{ground,F}} = 0$ dB). D'aquí s'obté: $A_{\text{boundary,F}} = A_{\text{dif,F}}$.

Nivell de pressió sonora continu equivalent en condicions homogènies (L_H) per a una trajectòria de propagació (S,R).

El procediment és exactament igual al cas de les condicions favorables descrit a la secció anterior.

$$L_H = L_{W,0,\text{dir}} - A_H \quad (2.5.7)$$

El terme A_H representa l'atenuació total al llarg de la trajectòria de propagació en condicions homogènies, i es desglossa de la manera següent:

$$A_H = A_{\text{div}} + A_{\text{atm}} + A_{\text{boundary,H}} \quad (2.5.8)$$

On:

A_{div} és l'atenuació per divergència geomètrica;

A_{atm} és l'atenuació per absorció atmosfèrica;

$A_{\text{boundary,H}}$ és l'atenuació pel límit del medi de propagació en condicions homogènies. Pot contenir els termes següents:

$A_{\text{ground,H}}$ que és l'atenuació pel terreny en condicions homogènies;

$A_{\text{dif,H}}$ que és l'atenuació per la difracció en condicions homogènies.

Per a una trajectòria de propagació i una banda de freqüències determinades, es poden donar els dos escenaris següents:

— $A_{\text{ground,H}}$ ($A_{\text{dif,H}} = 0$ dB) es calcula sense difracció i $A_{\text{boundary,H}} = A_{\text{ground,H}}$;

— o es calcula $A_{\text{dif,H}}$ ($A_{\text{ground,H}} = 0$ dB). L'efecte sòl es té en compte en la mateixa equació $A_{\text{dif,H}}$. D'aquí s'obté $A_{\text{boundary,H}} = A_{\text{dif,H}}$.

Enfocament estadístic en zones urbanes per a un trajecte (S,R).

Dins de les zones urbanes, també es pot adoptar un enfocament estadístic en el càlcul de la propagació sonora darrere de la primera línia d'edificis, sempre que el mètode utilitzat estigui degudament documentat, amb informació pertinent sobre la qualitat del mètode. Aquest mètode pot substituir el càlcul de $A_{\text{boundary,H}}$ i $A_{\text{boundary,F}}$ mitjançant una aproximació de l'atenuació total per a la trajectòria directa i totes les reflexions. El càlcul s'ha de basar en la densitat mitjana d'edificació i en l'altura mitjana de tots els edificis de la zona.

Nivell de pressió sonora continu equivalent a llarg termini per a una trajectòria de propagació (S,R).

El nivell de pressió sonora continu equivalent a «llarg termini» al llarg d'una trajectòria de propagació que parteix d'una font puntual determinada s'obté de la suma logarítmica de l'energia sonora ponderada en condicions homogènies i de l'energia sonora en condicions favorables.

Aquests nivells de pressió sonora continus equivalents es ponderen amb l'ocurrència mitjana p de condicions favorables en la direcció de la trajectòria de propagació (S,R):

$$L_{LT} = 10 \times \lg \left(p \cdot 10^{\frac{L_F}{10}} + (1-p) \cdot 10^{\frac{L_H}{10}} \right) \quad (2.5.9)$$

NB: els valors d'ocurrència p s'expressen en tant per u. Per tant, com a exemple, si el valor d'ocurrència és 82%, l'equació (2.5.9) seria $p = 0,82$.

Nivell de pressió sonora continu equivalent a llarg termini en el punt R per a totes les trajectòries de propagació.

El nivell de pressió sonora continu equivalent total a llarg termini en el receptor per a una banda de freqüències s'obté sumant energèticament les contribucions de totes les trajectòries de propagació N , inclosos tots els tipus:

$$L_{tot,LT} = 10 \times \lg \left(\sum_n 10^{\frac{L_{n,LT}}{10}} \right) \quad (2.5.10)$$

on

n és l'índex de les trajectòries de propagació entre S i R.

La consideració de les reflexions mitjançant fonts d'imatge es descriu més endavant. El percentatge d'ocurrències de condicions favorables en el cas d'un trajecte reflectit en un obstacle vertical es considera idèntic a l'ocurrència de la trajectòria de propagació directa.

Si S' és la font d'imatge de S, llavors l'ocurrència p' de la trajectòria de propagació (S',R) es considera igual a l'ocurrència p de la trajectòria de propagació (S,R).

Nivell de pressió sonora continu equivalent a llarg termini en el punt R en decibels A (dBA).

El nivell de pressió sonora continu equivalent total en decibels A (dBA) s'obté mitjançant la suma dels nivells en cada banda de freqüències:

$$L_{Aeq,LT} = 10 \times \lg \sum_i 10^{(L_{tot,LT,i} + AWC_{f_i})/10} \quad (2.5.11)$$

on i és l'índex de la banda de freqüències. AWC és la correcció amb ponderació A de conformitat amb la norma internacional CEI 61672-1:2003.

Aquest nivell $L_{Aeq,LT}$ constitueix el resultat final, és a dir, el nivell de pressió sonora continu equivalent amb ponderació A a llarg termini en el punt del receptor en un interval de temps de referència específic (per exemple, el dia o la tarda, o la nit o un interval més curt durant el dia, la tarda o la nit).

2.5.6. Càlcul de la propagació del soroll per a fonts viàries, ferroviàries i industrials.

Divergència geomètrica.

L'atenuació per divergència geomètrica, A_{div} , es correspon amb una reducció del nivell de pressió sonora continu equivalent a causa de la distància de propagació. Si es tracta d'una font sonora puntual en camp lliure, l'atenuació en dB s'obté mitjançant:

$$A_{div} = 20 \times \lg(d) + 11 \quad (2.5.12)$$

on d és la distància obliqua directa en 3D entre la font i el receptor.

Absorció atmosfèrica.

L'atenuació per absorció atmosfèrica A_{atm} durant la propagació per una distància d s'obté en dB mitjançant l'equació:

$$A_{\text{atm}} = \alpha_{\text{atm}} \cdot d / 1000 \quad (2.5.13)$$

on

d és la distància obliqua directa en 3D entre la font i el receptor en m;

α_{atm} és el coeficient d'atenuació atmosfèrica en dB/km a la freqüència central nominal per a cada banda de freqüències, en virtut de la norma ISO 9613-1.

Els valors del coeficient α_{atm} es proporcionen per a una temperatura de 15 °C, una humitat relativa del 70% i una pressió atmosfèrica de 101.325 Pa. Es calculen amb les freqüències centrals exactes de la banda de freqüències. Aquests valors compleixen la norma ISO 9613-1. S'ha d'utilitzar la mitjana meteorològica a llarg termini en cas que la informació meteorològica estigui disponible.

Efecte sòl.

L'atenuació per l'efecte sòl principalment és el resultat de la interferència entre el so reflectit i el so propagat directament des de la font al receptor. Està vinculada físicament a l'absorció sonora del sòl sobre el qual es propaga l'ona sonora. No obstant això, també depèn significativament de les condicions atmosfèriques durant la propagació, ja que la curvatura dels rajos modifica l'altura de la trajectòria per damunt del sòl i fa que els efectes sòl i el terreny ubicat a prop de la font siguin més o menys importants.

En cas que la propagació entre la font i el receptor es vegi afectada per algun obstacle en el pla de propagació, l'efecte sòl es calcula separatament respecte a la font i el receptor. En aquest cas, z_s i z_r fan referència a la posició de la font equivalent o del receptor, com s'indica més endavant quan s'explica el càlcul de la difracció A_{dif} .

Caracterització acústica del sòl.

Les propietats de l'absorció sonora del sòl estan estretament relacionades amb la seva porositat. El sòl compacte sol ser reflector, mentre que el sòl porós és absorbent.

Als efectes dels requisits de càlcul operatiu, l'absorció sonora d'un sòl es representa mitjançant un coeficient adimensional G , entre 0 i 1. G és independent de la freqüència. En el quadre 2.5.a s'ofereixen els valors de G del sòl en exteriors. En general, la mitjana del coeficient G respecte a un trajecte adopta valors compresos entre 0 i 1.

Quadre 2.5.a
Valors de G per a diferents tipus de sòl

| Descripció | Tipus | (kPa · s/m ²) | Valor G |
|--|-------|---------------------------|---------|
| Molt tou (neu o amb herba) | A | 12,5 | 1 |
| Sòl forestal tou (amb bruc curt i dens o molsa densa) | B | 31,5 | 1 |
| Sòl tou no compacte (gespa, herba o sòl bla) | C | 80 | 1 |
| Sòl no compacte normal (sòl forestal i sòl de pasturatge) | D | 200 | 1 |
| Terreny compactat i grava (gespa compactada i zones de parcs) | E | 500 | 0,7 |
| Sòl dens compactat (carretera de grava o aparcaments) | F | 2.000 | 0,3 |
| Superfícies dures (formigó i paviment d'asfalt convencional) | G | 20.000 | 0 |
| Superfícies molt dures i denses (asfalt dens, formigó i aigua) | H | 200.000 | 0 |

G_{path} es defineix com la fracció de terreny absorbent present sobre tota la trajectòria de propagació coberta.

Quan la font i el receptor estan a prop de manera que $d_p \leq 30(z_s + z_r)$, la distinció entre el tipus de terreny ubicat a prop de la font i el tipus de terreny ubicat a prop del receptor és insignificant. Per tenir en compte aquest comentari, el factor de sòl G_{path} es corregeix en darrera instància de la manera següent:

$$G'_{path} = \begin{cases} G_{path} \frac{d_p}{30(z_s + z_r)} + G_s \left(1 - \frac{d_p}{30(z_s + z_r)} \right) & \text{si } d_p \leq 30(z_s + z_r) \\ G_{path} & \text{en la resta de casos} \end{cases} \quad (2.5.14)$$

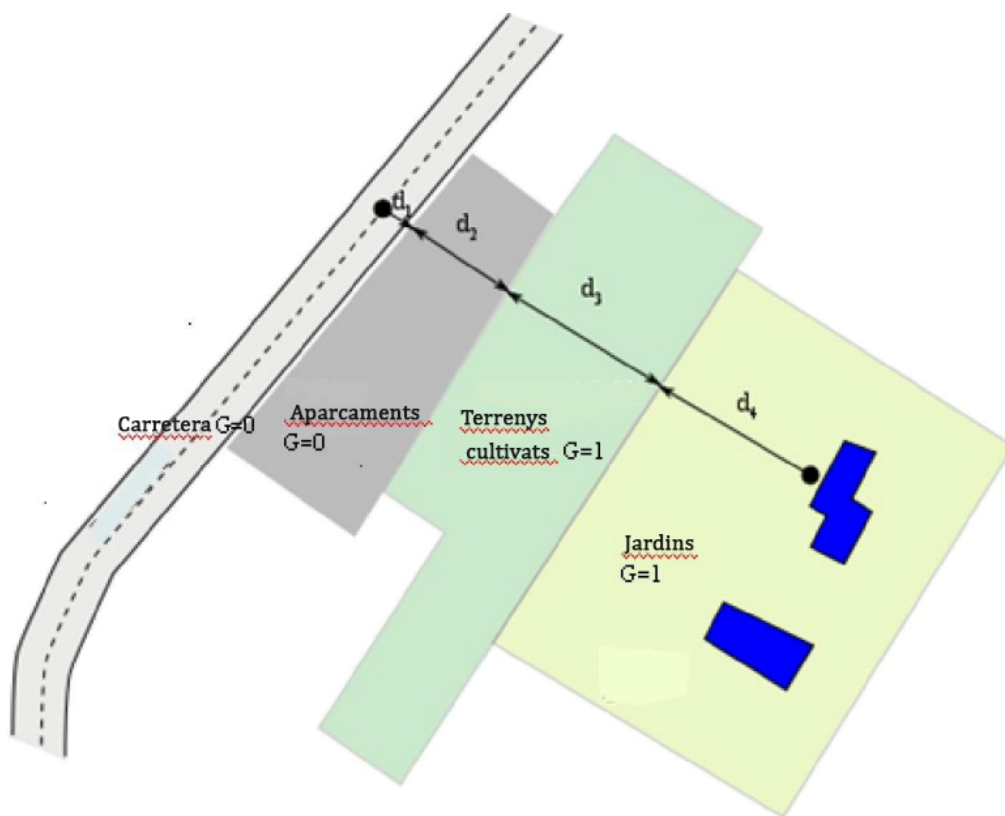
on G_s és el factor de sòl de la font del tipus àrea. $G_s = 0$ per a plataformes de carretera⁴ i vies en placa. $G_s = 1$ per a vies fèrries sobre balast. No hi ha una regla general per al cas de les plantes i les fonts industrials.

G pot estar vinculada a la resistivitat al flux.

⁴ L'absorció dels paviments de carreteres porosos es té en compte en el model d'emissions.

Figura 2.5.b

Determinació del coeficient del sòl G_{path} sobre una trajectòria de propagació



$$d_p = d_1 + d_2 + d_3 + d_4$$

$$G_{path} = (0 \cdot d_1 + 0 \cdot d_2 + 1 \cdot d_3 + 1 \cdot d_4) / d_p = (d_3 + d_4) / d_p$$

En els dos subapartats següents sobre els càlculs en condicions homogènies i favorables es presenten les notacions genèriques $\overline{G_w}$ i $\overline{G_m}$ per a l'absorció del terreny. En el quadre 2.5.b s'ofereixen les correspondències entre aquestes notacions i les variables G_{path} i G'_{path} .

Quadre 2.5.b
Correspondència entre $\overline{G_w}$ i $\overline{G_m}$ i (G_{path} , G'_{path})

| | Condicions homogènies | | | Condicions favorables | | |
|------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|
| | A_{ground} | $\Delta_{ground(S,O)}$ | $\Delta_{ground(O,R)}$ | A_{ground} | $\Delta_{ground(S,O)}$ | $\Delta_{ground(O,R)}$ |
| $\overline{G_w}$ | G'_{path} | | | G_{path} | | |
| $\overline{G_m}$ | G'_{path} | | G_{path} | G'_{path} | | G_{path} |

Càlculs en condicions homogènies.

L'atenuació per l'efecte sòl en condicions homogènies es calcula amb les equacions següents:

si $G_{\text{path}} \neq 0$

$$A_{\text{ground,H}} = \max \left(-10 \times \lg \left[4 \frac{k^2}{d_p^2} \left(z_s^2 - \sqrt{\frac{2C_f}{k} z_s + \frac{C_f}{k}} \right) \left(z_r^2 - \sqrt{\frac{2C_f}{k} z_r + \frac{C_f}{k}} \right) \right], A_{\text{ground,H,min}} \right) \quad (2.5.15)$$

on

$$k = \frac{2\pi f_m}{c}$$

f_m és la freqüència central nominal de la banda de freqüències considerada, en Hz, c és la velocitat del so en l'aire, considerada igual a 340 m/s, i C_f es defineix com:

$$C_f = d_p \frac{1 + 3wd_p e^{-\sqrt{wd_p}}}{1 + wd_p} \quad (2.5.16)$$

on els valors de w s'obtenen mitjançant l'equació següent:

$$w = 0,0185 \frac{f_m^{2.5} \overline{G_w}^{2.6}}{f_m^{1.5} \overline{G_w}^{2.6} + 1,3 \cdot 10^3 f_m^{0.75} \overline{G_w}^{1.3} + 1,16 \cdot 10^6} \quad (2.5.17)$$

$\overline{G_w}$ pot ser igual a G_{path} o G'_{path} , en funció de si l'efecte sòl es calcula amb o sense difracció i segons la naturalesa del terreny que hi ha sota la font (font real o difractada). Això s'especifica en els subapartats següents i es resumeix al quadre 2.5.b.

$$A_{\text{ground,H,min}} = -3(1 - \overline{G_m}) \quad (2.5.18)$$

és el límit inferior de $A_{\text{ground,H}}$.

Per a una trajectòria de propagació (S_i, R) en condicions homogènies sense difracció:

$$\overline{G_w} = G'_{\text{path}}$$

$$\overline{G_m} = G'_{\text{path}}$$

Amb difracció, vegeu la secció sobre la difracció per a les definicions de $\overline{G_w}$ i $\overline{G_m}$

si $G_{\text{path}} = 0$: $A_{\text{ground,H}} = -3$ dB

El terme $-3(1 - \overline{G_m})$ té en compte el fet que, quan la font i el receptor estan molt allunyats, la primera reflexió al costat de la font ja no està en la plataforma, sinó sobre terreny natural.

Càlculs en condicions favorables.

L'efecte sòl en condicions favorables es calcula amb l'equació $A_{\text{ground,H}}$, sempre que s'efectuïn les modificacions següents:

Si $G_{\text{path}} \neq 0$

a) En l'equació $A_{\text{ground,H}}$, les altures z_s i z_r se substitueixen per $z_s + \delta z_s + \delta z_T$ i $z_r + \delta z_r + \delta z_T$, respectivament, on

$$\begin{cases} \delta z_s = a_0 \left(\frac{z_s}{z_s + z_r} \right)^2 \frac{d_p^2}{2} \\ \delta z_r = a_0 \left(\frac{z_r}{z_s + z_r} \right)^2 \frac{d_p^2}{2} \end{cases} \quad (2.5.19)$$

$a_0 = 2 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$ és l'invers del radi de curvatura

$$\delta z_T = 6 \cdot 10^{-3} \frac{d_p}{z_s + z_r}$$

b) El límit inferior de $A_{\text{ground,F}}$ depèn de la geometria de la trajectòria:

$$A_{\text{ground,F,min}} = \begin{cases} -3(1 - \overline{G_m}) & \text{si } d_p \leq 30(z_s + z_r) \\ -3(1 - \overline{G_m}) \cdot \left(1 + 2 \left(1 - \frac{30(z_s + z_r)}{d_p} \right) \right) & \text{En la resta de casos} \end{cases} \quad (2.2.20)$$

Si $G_{\text{path}} = 0$

$$A_{\text{ground,F}} = A_{\text{ground,F,min}}$$

Les correccions de l'altura δz_s i δz_r transmeten l'efecte de la curvatura del raig acústic. δz_T representa l'efecte de la turbulència.

$\overline{G_m}$ pot ser igual a G_{path} o G'_{path} , en funció de si l'efecte sòl es calcula amb o sense difracció i segons la naturalesa del terreny que hi ha sota la font (font real o difractada). Això s'especifica en els subapartats següents:

Per a un trajecte (S_i, R) en condicions favorables sense difracció:

$$\overline{G_w} = G_{\text{path}} \text{ en l'equació (2.5.17);}$$

$$\overline{G_m} = G'_{\text{path}}.$$

Amb difracció, vegeu la secció següent per a les definicions de $\overline{G_w}$ i $\overline{G_m}$.

Difracció.

Per norma general, la difracció s'ha d'estudiar a la part superior de cada obstacle ubicat en la trajectòria de propagació. Si la trajectòria passa a una «altura suficient» per damunt de la vora de difracció, es pot definir $A_{\text{dif}} = 0$ i es pot calcular una trajectòria directa, en particular mitjançant l'avaluació de A_{ground} .

A la pràctica, per a cada freqüència central de la banda de freqüències, la diferència de la trajectòria δ es compara amb la quantitat $-\lambda/20$. Si un obstacle no produeix difracció, per exemple si això es pot determinar segons el criteri de Rayleigh, no és necessari calcular A_{dif} per a la banda de freqüències considerada. En altres paraules, $A_{\text{dif}} = 0$ en aquest cas. Si no, A_{dif} es calcula segons es descriu a les altres parts d'aquesta secció. Aquesta norma s'aplica tant en condicions homogènies com favorables, per a la difracció individual i múltiple.

Si, per a una banda de freqüències determinada, s'efectua un càlcul seguint el procediment descrit en aquesta secció, A_{ground} es defineix com a igual a 0 dB quan es calcula l'atenuació total. L'efecte sòl es té en compte directament en l'equació per al càlcul general de la difracció.

Les equacions proposades s'utilitzen per avaluar la difracció en pantalles primes, pantalles gruixudes, edificis, dics de terra (naturals o artificials) i a les vores de terraplens, desmunts i viaductes.

Si hi ha diversos obstacles amb capacitat de difracció en una trajectòria de propagació, es tracten com una difracció múltiple mitjançant l'aplicació del procediment que es descriu a la secció següent, que tracta sobre el càlcul de la diferència de trajecte.

Els procediments que aquí es descriuen s'utilitzen per calcular les atenuacions tant en condicions homogènies com favorables. La curvatura del raig es té en compte en el càlcul de la diferència de trajecte i per calcular els efectes sòl abans i després de la difracció.

Principis generals.

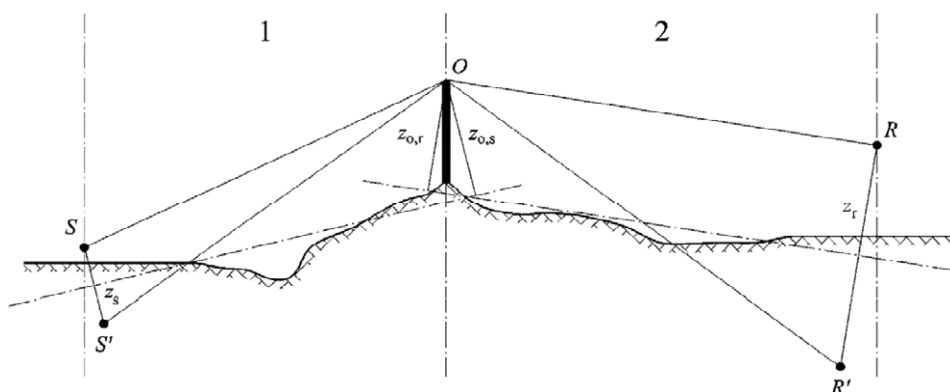
La figura 2.5.c il·lustra el mètode general de càlcul de l'atenuació per difracció. Aquest mètode consisteix a dividir en dos la trajectòria de propagació: la trajectòria del «costat de la font», ubicada entre la font i el punt de difracció, i la trajectòria del «costat del receptor», ubicada entre el punt de difracció i el receptor.

Es calcula el següent:

- un efecte sòl, en el costat de la font, $\Delta_{\text{ground}}(S,O)$
- un efecte sòl, en el costat del receptor, $\Delta_{\text{ground}}(O,R)$
- i tres difraccions:
 - entre la font S i el receptor R: $\Delta_{\text{dif}}(S,R)$
 - entre la imatge de la font S' i R: $\Delta_{\text{dif}}(S',R)$
 - entre S i la imatge del receptor R': $\Delta_{\text{dif}}(S,R')$

Figura 2.5.c

Geometria d'un càlcul de l'atenuació per difracció



- 1: Costat de la font
- 2: Costat del receptor

on

S és la font;

R és el receptor;

S' és la imatge de la font respecte al pla mitjà del sòl en el costat de la font;

R' és la imatge del receptor respecte al pla mitjà del sòl en el costat del receptor;

O és el punt de difracció;

z_s és l'altura equivalent de la font S respecte al pla mitjà del sòl en el costat de la font;

$z_{o,s}$ és l'altura equivalent del punt de difracció O respecte al pla mitjà del sòl en el costat de la font;

z_r és l'altura equivalent del receptor R respecte al pla mitjà del sòl en el costat del receptor;

$z_{o,r}$ és l'altura equivalent del punt de difracció O respecte al pla mitjà del sòl en el costat del receptor.

La irregularitat del sòl entre la font i el punt de difracció, i entre el punt de difracció i el receptor, es té en compte mitjançant altures equivalents calculades en relació amb el pla mitjà del sòl, el primer costat de la font i el segon costat del receptor (dos plans mitjans del sòl) segons el mètode descrit en el subapartat dedicat a les altures importants sobre el sòl.

Difracció pura.

Per a la difracció pura, sense efectes sòl, l'atenuació es calcula mitjançant:

$$\Delta_{dif} = \begin{cases} 10C_h \cdot \lg \left(3 + \frac{40}{\lambda} C'' \delta \right) & \text{si } \frac{40}{\lambda} C'' \delta \geq -2 \\ 0 & \text{En la resta de casos} \end{cases} \quad (2.5.21)$$

On

$$C_h = 1 \quad (2.5.22)$$

λ és la longitud d'ona de la freqüència central nominal de la banda de freqüències considerada;

δ és la diferència de trajecte entre la trajectòria difractada i la trajectòria directa (vegeu el subapartat següent sobre el càlcul de la diferència de trajecte);

C'' és un coeficient utilitzat per tenir en compte difraccions múltiples:

$C'' = 1$ per a una única difracció.

Per a una difracció múltiple, si e és la distància total de la trajectòria de propagació, O1 a O2 + O2 a O3 + O3 a O4 a partir del «mètode de la banda elàstica» (vegeu les figures 2.5.d i 2.5.f), i si e excedeix 0,3 m (si no, $C'' = 1$), aquest coeficient es defineix com:

$$C'' = \frac{1 + \left(\frac{5\lambda}{e} \right)^2}{\frac{1}{3} + \left(\frac{5\lambda}{e} \right)^2} \quad (2.5.23)$$

Els valors de Δ_{dif} han d'estar limitats:

— si $\Delta_{\text{dif}} < 0$: $\Delta_{\text{dif}} = 0$ dB

— si $\Delta_{\text{dif}} > 25$: $\Delta_{\text{dif}} = 25$ dB per a una difracció sobre la vora horitzontal i només sobre el terme Δ_{dif} que figura en el càlcul de A_{dif} . Aquest límit superior no s'ha d'aplicar en els termes Δ_{dif} que intervien en el càlcul de Δ_{ground} , o per a una difracció sobre una vora vertical (difracció lateral) en el cas de la cartografia del soroll industrial.

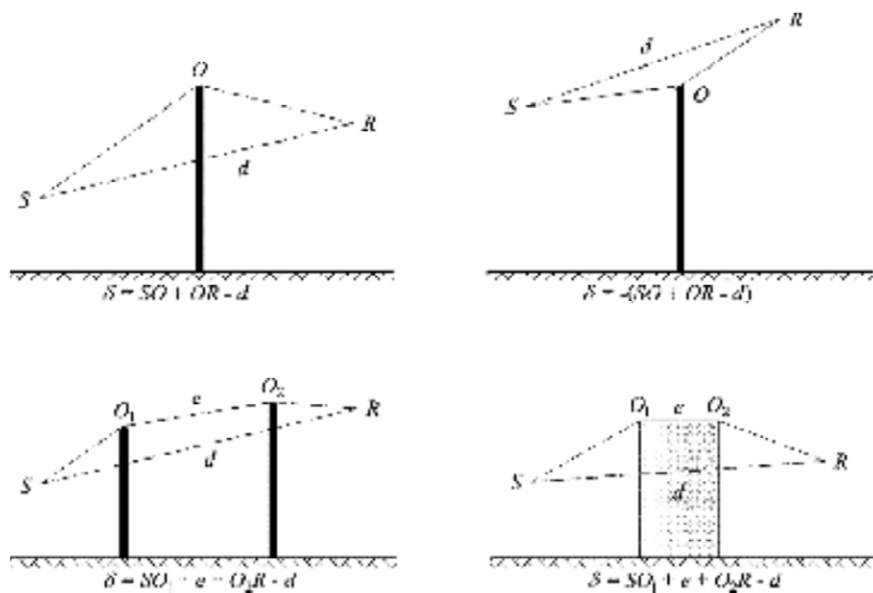
Càlcul de la diferència de trajecte.

La diferència de trajecte δ es calcula en un pla vertical que conté la font i el receptor. Es tracta d'una aproximació en relació amb el principi de Fermat. L'aproximació continua sent aplicable aquí (fonts lineals). La diferència de trajecte δ es calcula com s'il·lustra en les figures següents, en funció de les situacions de què es tracti.

Condicions homogènies.

Figura 2.5.d

Càlcul de la diferència de trajecte en condicions homogènies. O, O₁ i O₂ són els punts de difracció

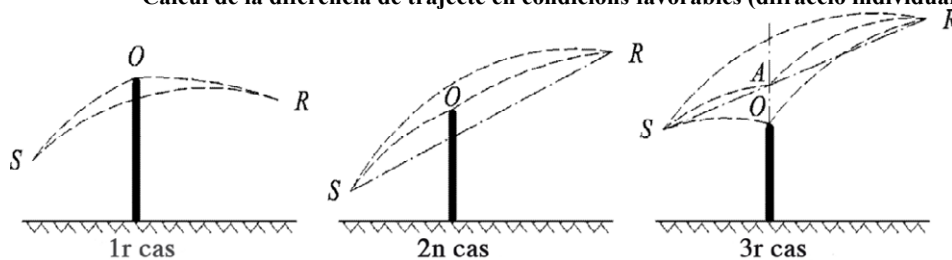


Nota: per a cada configuració, es proporciona l'expressió de δ .

Condicions favorables

Figura 2.5.e

Càlcul de la diferència de trajecte en condicions favorables (difracció individual)



En condicions favorables, es considera que els tres rajos de so corbats SO, OR i SR tenen un radi de curvatura idèntic Γ definit mitjançant:

$$\Gamma = \max(1000, 8d) \quad (2.5.24)$$

La longitud d'una corba del raig sonor MN es representa com a \widehat{MN} en condicions favorables. La longitud és igual a

$$\widehat{MN} = 2\Gamma \arcsin\left(\frac{MN}{2\Gamma}\right) \quad (2.5.25)$$

En principi, s'han de considerar tres escenaris en el càlcul de la diferència de trajecte en condicions favorables δ_F (vegeu la figura 2.5.e). A la pràctica, dues equacions són suficients:

— si el raig sonor recte SR és emmascarat mitjançant l'obstacle (primer i segon cas de la figura 2.5.e):

$$\delta_F = \widehat{SO} + \widehat{OR} - \widehat{SR} \quad (2.5.26)$$

— si el raig sonor recte SR no és emmascarat mitjançant l'obstacle (tercer cas de la figura 2.5.e):

$$\delta_F = 2\widehat{SA} + 2\widehat{AR} - \widehat{SO} - \widehat{OR} - \widehat{SR} \quad (2.5.27)$$

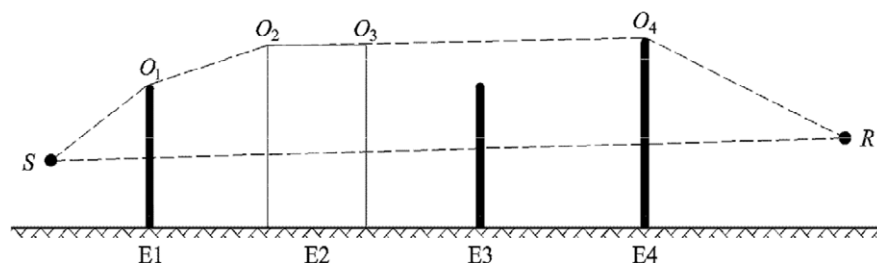
on A és la intersecció del raig sonor recte SR i l'extensió de l'obstacle difractor. Per a múltiples difraccions en condicions favorables:

- determinar l'envoltant convexa definida per les diferents vores potencials de difracció;
- eliminar les vores de difracció que no estan dins del límit de l'envoltant convexa;
- calcular δ_F en funció de les longituds del raig sonor corbat, dividint la trajectòria difractada en tots els segments corbats que siguin necessaris (vegeu la figura 2.5.f).

$$\delta_F = \widehat{SO}_1 + \sum_{i=1}^{i=n-1} O_i \widehat{O}_{i+1} + \widehat{O}_n R - \widehat{SR} \quad (2.5.28)$$

Figura 2.5.f

Exemple de càlcul de la diferència de trajecte en condicions favorables, en el cas de difraccions múltiples



En l'escenari que presenta la figura 2.5.f, la diferència de trajecte és:

$$\delta_F = \widehat{SO}_1 + O_1 \widehat{O}_2 + O_2 \widehat{O}_3 + O_3 \widehat{O}_4 + \widehat{O}_4 R - \widehat{SR} \quad (2.2.29)$$

Càlcul de l'atenuació A_{dif} .

L'atenuació per difracció, tenint en compte els efectes sols en el costat de la font i en el costat del receptor, es calcula mitjançant les equacions generals següents:

$$A_{dif} = \Delta_{dif(S,R)} + \Delta_{ground(S,O)} + \Delta_{ground(O_n,R)} \quad (2.5.30)$$

on

- $\Delta_{\text{dif}(S,R)}$ és l'atenuació per la difracció entre la font S i el receptor R;
- $\Delta_{\text{ground}(S,O)}$ és l'atenuació per l'efecte sòl en el costat de la font, ponderada mitjançant la difracció en el costat de la font; on s'entén que $O = O_1$ en el cas de difraccions múltiples, tal com il·lustra la figura 2.5.f
- $\Delta_{\text{ground}(O,R)}$ és l'atenuació per l'efecte sòl en el costat del receptor, ponderada mitjançant la difracció en el costat del receptor (vegeu el subapartat següent sobre el càlcul del terme $\Delta_{\text{ground}(O,R)}$).

Càlcul del terme $\Delta_{\text{ground}(S,O)}$.

$$\Delta_{\text{ground}(S,O)} = -20 \times \lg \left(1 + \left(10^{-A_{\text{ground}(S,O)}/20} - 1 \right) \cdot 10^{-\left(\Delta_{\text{dif}(S',R)} - \Delta_{\text{dif}(S,R)}\right)/20} \right) \quad (2.5.31)$$

on

- $A_{\text{ground}(S,O)}$ és l'atenuació per l'efecte sòl entre la font S i el punt de difracció O. Aquest terme es calcula com s'ha indicat en el subapartat anterior relatiu als càlculs en condicions homogènies i en el subapartat anterior que tracta sobre el càlcul en condicions favorables, amb les hipòtesis següents:

$$Z_t = Z_{0,S};$$

- G_{path} es calcula entre S i O;
- En condicions homogènies: $\overline{G}_w = \overline{G}'_{\text{path}}$ en l'equació (2.5.17), $G_m = \overline{G}'_{\text{path}}$ en l'equació (2.5.18);
- En condicions favorables: $G_w = \overline{G}_{\text{path}}$ en l'equació (2.5.17), $G_m = \overline{G}_{\text{path}}$ en l'equació (2.5.20);
- $\Delta_{\text{dif}(S',R)}$ és l'atenuació per la difracció entre la imatge de la font S' i R, calculada segons s'ha indicat en el subapartat anterior sobre la difracció pura;
- $\Delta_{\text{dif}(S,R)}$ és l'atenuació per la difracció entre S i R, calculada com en el subapartat VI.4.4.b.

Càlcul del terme $\Delta_{\text{ground}(O,R)}$

$$\Delta_{\text{ground}(O,R)} = -20 \times \lg \left(1 + \left(10^{-A_{\text{ground}(O,R)}/20} - 1 \right) \cdot 10^{-\left(\Delta_{\text{dif}(S,R)} - \Delta_{\text{dif}(S',R)}\right)/20} \right) \quad (2.5.32)$$

on

- $A_{\text{ground}(O,R)}$ és l'atenuació per l'efecte sòl entre el punt de difracció O i el receptor R. Aquest terme es calcula com s'ha indicat en el subapartat anterior relatiu als càlculs en condicions homogènies i en el subapartat anterior que tracta sobre el càlcul en condicions favorables, amb les hipòtesis següents:

$$Z_s = Z_{0,R}$$

- G_{path} es calcula entre O i R.

No és necessari tenir en compte aquí la correcció de G'_{path} , ja que la font considerada és el punt de difracció. Per tant, G_{path} s'ha d'utilitzar per calcular els efectes sòl, fins i tot per al terme del límit inferior de l'equació $-3(1 - G_{\text{path}})$.

- En condicions homogènies, $G_w = \overline{G}_{\text{path}}$ en l'equació (2.5.17) i $G_m = \overline{G}_{\text{path}}$ en l'equació (2.5.18);

- En condicions favorables, $G_w = \overline{G}_{\text{path}}$ en l'equació (2.5.17) i $G_m = \overline{G}_{\text{path}}$ en l'equació (2.5.20);
- $\Delta_{\text{dif}(S,R)}$ és l'atenuació per difracció entre S i la imatge del receptor R', calculada com s'ha descrit a la secció anterior relativa a la difracció pura;
- $\Delta_{\text{dif}(S,R)}$ és l'atenuació per difracció entre S i R, calculada com s'ha descrit en el subapartat anterior sobre la difracció pura.

Escenaris de vores verticals.

L'equació (2.5.21) es pot utilitzar per calcular les difraccions en les vores verticals (difraccions laterals) en el cas del soroll industrial. Si es dona aquest cas, es considera $A_{\text{dif}} = \Delta_{\text{dif}(S,R)}$ i es manté el terme A_{ground} . Així mateix, A_{atm} i A_{ground} s'han de calcular a partir de la longitud total de la trajectòria de propagació. A_{div} es calcula també a partir de la distància directa d. Les equacions (2.5.8) i (2.5.6), respectivament, són:

$$A_H = A_{\text{div}} + A_{\text{atm}}^{\text{path}} + A_{\text{ground,H}}^{\text{path}} + \Delta_{\text{dif,H}(S,R)} \quad (2.5.33)$$

$$A_F = A_{\text{div}} + A_{\text{atm}}^{\text{path}} + A_{\text{ground,F}}^{\text{path}} + \Delta_{\text{dif,F}(S,R)} \quad (2.5.34)$$

Δ_{dif} s'utilitza en condicions homogènies en l'equació (2.5.34).

Reflexió sobre obstacles verticals.

Atenuació per absorció.

Les reflexions sobre obstacles verticals es tracten mitjançant imatge de les fonts. Les reflexions sobre les façanes dels edificis i les barreres acústiques es tracten d'aquesta forma.

Un obstacle es considera vertical si la seva inclinació en relació amb la vertical és inferior a 15°.

En el cas de reflexions sobre objectes la inclinació dels quals en relació amb la vertical és superior o igual a 15°, no es té en compte l'objecte.

Els obstacles en què almenys una dimensió és inferior a 0,5 m s'han d'ignorar en el càlcul de la reflexió, excepte per a configuracions especials.⁵

Noteu que les reflexions sobre el sòl no es tracten aquí. Es tenen en compte en els càlculs de l'atenuació a causa dels límits (sòl i difracció).

Si L_{WS} és el nivell de potència de la font S i α_r el coeficient d'absorció de la superfície de l'obstacle tal com defineix la norma EN 1793-1:2013, llavors el nivell de potència de la imatge de la font S' és igual a:

$$L_{WS'} = L_{WS} + 10 \cdot \lg(1 - \alpha_r) = L_{WS} + A_{\text{refl}} \quad (2.5.35)$$

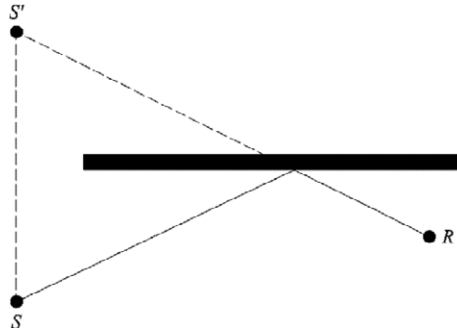
on $0 \leq \alpha_r < 1$

Les atenuacions en la propagació descrites anteriorment s'apliquen a aquest trajecte (imatge de la font - receptor), com s'apliquen a un trajecte directe.

⁵ Una xarxa d'obstacles petits en un pla i a intervals regulars constitueix un exemple de configuració especial.

Figura 2.5.g

Reflexió especular sobre un obstacle tractat mitjançant el mètode de la imatge de la font
(S: font, S': imatge de la font, R: receptor)



Atenuació per la retrodifracció.

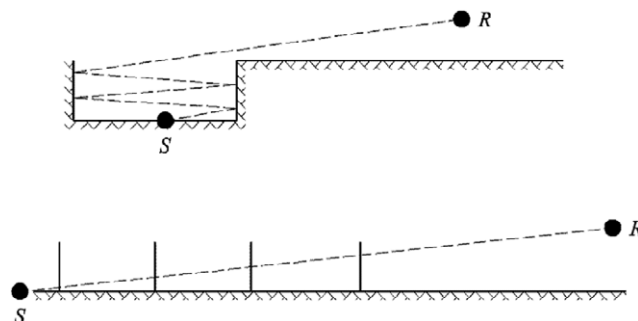
En la recerca geomètrica de trajectes acústics, durant la reflexió en un obstacle vertical (un mur o un edifici), la posició de l'impacte del raig en relació amb la vora superior d'aquest obstacle determina la proporció més o menys important de l'energia reflectida efectivament. Aquesta pèrdua d'energia sonora quan el raig experimenta una reflexió es denomina atenuació a través de la retrodifracció.

En cas que es donin possibles reflexions múltiples entre dos murs verticals, almenys s'ha de tenir en compte la primera reflexió.

Si es tracta d'una trinxera (vegeu, per exemple, la figura 2.5.h), l'atenuació per retrodifracció s'ha d'aplicar a cada reflexió en els murs de contenció.

Figura 2.5.h

Raig sonor reflectit en l'ordre de 4 en una pista d'una via en trinxera: secció transversal real (dalt) i secció transversal desplegada (baix)



En aquesta representació, el raig sonor arriba al receptor «passant posteriorment a través dels» murs de contenció de la rasa, que, per tant, es pot comparar amb les obertures.

Quan es calcula la propagació a través d'una obertura, el camp acústic en el receptor és la suma del camp directe i el camp difractat per les vores de l'obertura. Aquest camp difractat garanteix la continuïtat de la transició entre

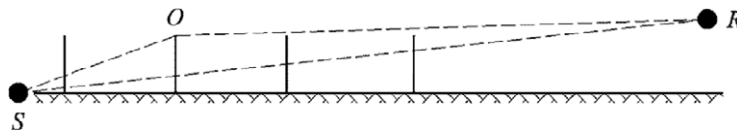
l'àrea lliure i l'àrea ombrejada. Quan el raig arriba a la vora de l'obertura, el camp directe s'atenua. El càlcul és idèntic al de l'atenuació mitjançant una barrera en l'àrea lliure.

La diferència de trajecte δ' associada amb cada retrodifracció és oposada a la diferència de trajecte entre S i R respecte a cada vora superior O, en una secció transversal desplegada (vegeu la figura 2.5.i).

$$\delta' = - (SO + OR - SR) \quad (2.5.36)$$

Figura 2.5.i

La diferència de trajecte per a la segona reflexió



El signe «menys» de l'equació (2.5.36) significa que el receptor es té en compte aquí en l'àrea lliure.

L'atenuació a través de la retrodifracció Δ_{retrodif} s'obté mitjançant l'equació (2.5.37), que és similar a l'equació (2.5.21) amb notacions reformulades.

$$\Delta_{\text{retrodif}} = \begin{cases} 10C_h \cdot \lg \left(3 + \frac{40}{\lambda} \delta' \right) & \text{si } \frac{40}{\lambda} \delta' \geq -2 \\ 0 & \text{en la resta de casos} \end{cases} \quad (2.5.37)$$

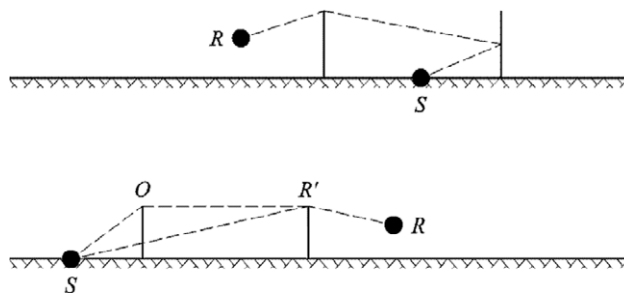
Aquesta atenuació s'aplica al raig directe cada vegada que «passa a través» (es reflecteix) d'un mur o edifici. El nivell de potència de la imatge de la font S' és:

$$L_{W'} = L_W + 10 \times \lg(1 - \alpha_r) - \Delta_{\text{retrodif}} \quad (2.5.38)$$

En configuracions de propagació complexes, poden existir difraccions entre reflexions, o bé entre el receptor i les reflexions. En aquest cas, la retrodifracció dels murs es calcula en considerar la trajectòria entre la font i el primer punt de difracció R' (considerat per tant com el receptor en l'equació (2.5.36)). Aquest principi s'il·lustra a la figura 2.5.j.

Figura 2.5.j

La diferència de trajecte amb presència d'una difracció: secció transversal real (dalt) i secció transversal desplegada (baix)



En cas de reflexions múltiples, s'afegeixen les reflexions per cada reflexió individual.

2.6. Disposicions generals — Soroll d'aeronaus.

2.6.1. Definicions i símbols.

Aquí es descriuen alguns termes importants i se'ls atribueixen significats generals en aquest document. La llista no és completa; de fet, només s'inclouen expressions i acrònims que s'utilitzen sovint. D'altres es descriuen la primera vegada que apareixen.

Els símbols matemàtics (que apareixen després dels termes) són els símbols principals que s'utilitzen en les equacions en el text principal. Altres símbols utilitzats localment en el text i en els apèndixs es defineixen quan s'utilitzen.

Periòdicament es recorda al lector la intercanviabilitat de les paraules so i soroll en aquest document. Encara que la paraula soroll té connotacions subjectives —els tècnics acústics solen definir-lo com a «so interferent»—, en el camp del control de soroll d'aeronaus se sol considerar només com a so —energia aèria transmesa pel moviment de les ones sonores—. El símbol -> denota referències encruades a altres termes inclosos a la llista.

Definicions

| | |
|---|--|
| AIP | Publicació d'informació aeronàutica. |
| Configuració de l'aeronau | Posició dels slats, els flaps i els trens d'aterratge. |
| Moviments d'aeronaus | Un aterratge, un enlairament o una altra acció de l'aeronau que afecta l'exposició al soroll al voltant d'un aeròdrom. |
| Dades de soroll i rendiment (performance) de les aeronaus | Dades que descriuen les característiques acústiques i de rendiment (performance) dels diferents tipus d'avions necessàries per al procés de modelització. Inclouen les -> <i>corbes NPD</i> i informació que permet calcular la potència o l'impuls del reactor com una funció de la -> <i>configuració del vol</i> . Les dades sol facilitar-les el fabricant de l'aeronau, encara que, quan no és possible, de vegades s'obtenen d'altres fonts. Si no hi ha dades disponibles, és habitual representar l'aeronau de què es tracti adaptant les dades per a una aeronau convenientment similar —a això es fa referència amb el terme substitució—. |
| Altitud | Altura per sobre del nivell mitjà del mar. |
| Base de dades ANP | La base de dades del soroll i el rendiment de les aeronaus s'inclou a l'apèndix I. |
| Nivell sonor amb ponderació A, | <i>L_A</i> Escala bàsica de nivell de so/soroll utilitzada per mesurar el soroll ambiental, inclòs el que generen les aeronaus i en el qual es basa la majoria de les mètriques de les corbes de nivell de soroll (isòfones). |
| Trajectòria principal en terra | Una línia representativa o ruta nominal que defineix el centre d'una banda de dispersió de trajectòries. |
| Nivell de l'esdeveniment sonor de la línia base | El nivell de l'esdeveniment sonor que figura en una base de dades NPD. |
| Alliberament del fre | <i>Punt de partida de rodatge</i> |

| | |
|---|--|
| Impuls net corregit | En un reglatge de la potència determinat (per exemple, EPR o N1), l'impuls net disminueix quan disminueix la densitat de l'aire, per la qual cosa augmenta quan augmenta l'altitud de l'aeroplà; l'impuls net corregit és el valor al nivell del mar. |
| Nivell de so/soroll acumulat | Una mesura en decibels del soroll rebut durant un període de temps específic, en un punt pròxim a un aeroport, amb trànsit aeri en condicions de funcionament i trajectòries de vol normals. Es calcula mitjançant l'acumulació dels nivells de so/soroll de l'esdeveniment que es produeixen en el punt esmentat. |
| Suma o mitjana de decibels | De vegades es denomina suma o mitjana energètica o logarítmica (en oposició amb els valors aritmètics). S'utilitza per sumar o calcular la mitjana de quantitats expressades en nivells; per exemple, la suma de decibels: $= 10 \cdot \lg \sum 10^{L_i/10}$ |
| Fracció d'energia, F | Relació entre l'energia acústica rebuda del segment i l'energia rebuda de la trajectòria de vol infinita. |
| Reglatge de potència del motor | Valor del \rightarrow <i>paràmetre de potència relacionat amb el soroll</i> utilitzat per determinar l'emissió de soroll que figura a la base de dades NPD. |
| Nivell sonor continu equivalent, L_{eq} | Una mesura del so a llarg termini. És el nivell sonor d'un so continu estable, que durant un període de temps específic conté la mateixa energia total que el so variable real. |
| Nivell de so/soroll de l'esdeveniment | Una mesura en decibels de l'energia acústica rebuda pel pas d'un avió \rightarrow <i>nivell d'exposició al soroll</i> |
| Configuració del vol | $= \rightarrow$ <i>Configuració de l'aeronau + \rightarrow Paràmetres del vol</i> |
| Paràmetres del vol | Reglatge de la potència de l'aeronau, velocitat, angle de balanceig i pes. |
| Trajectòria del vol | La trajectòria d'un avió en l'aire, definida en tres dimensions, normalment amb referència a un origen en el punt de la carrera d'enlairament o en el llinard d'aterratge. |
| Segment de la trajectòria del vol | Part de la trajectòria del vol d'una aeronau representada als efectes de modelització acústica mitjançant una línia recta de longitud finita. |
| Procediment del vol | La seqüència de passos operatius que segueix la tripulació o el sistema de gestió del vol expressada com a canvis de la configuració del vol com una funció de distància al llarg de la trajectòria en terra. |
| Perfil del vol | Variació de l'altura de l'avió al llarg de la trajectòria en terra (de vegades també inclou canvis de \rightarrow <i>configuració del vol</i>), que es descriu com un conjunt de \rightarrow <i>punts del perfil</i> . |
| Pla de terra | (O terra nominal) Superfície de terra horitzontal a través del punt de referència de l'aeròdrom en què se solen calcular les corbes de nivell de soroll. |
| Velocitat respecte al sòl | Velocitat de l'aeroplà relativa a un punt fix en el sòl. |

| | |
|-------------------------------------|---|
| Trajectòria en terra | Projecció vertical de la trajectòria de vol en el pla de terra. |
| Altura | Distància vertical entre l'avió i el -> <i>pla de terra</i> . |
| Nivell sonor integrat | També denominat -> <i>nivell d'exposició sonora d'esdeveniment simple</i> . |
| ISA | Atmosfera tipus internacional definida per l'OACI. Defineix la variació de la temperatura de l'aire, la pressió i la densitat amb l'altura sobre el nivell mitjà del mar. S'utilitza per normalitzar els resultats dels càlculs de disseny de l'avió i l'anàlisi de les dades de prova. |
| Atenuació lateral | Excés d'atenuació del so amb una distància atribuïble, directament o indirectament, a la presència de la superfície del terreny. Important a angles baixos d'elevació (de l'aeroplà per sobre del pla de terra). |
| Nivell sonor de soroll màxim | El nivell sonor màxim assolit durant un esdeveniment. |
| Nivell mitjà del mar, MSL | L'elevació estàndard de la superfície terrestre a què fa referència la -> <i>ISA</i> . |
| Impuls net | La força propulsora exercida per un motor en el fusellatge. |
| Soroll | El soroll es defineix com a so no desitjat. No obstant això, les mètriques com el <i>nivell sonor amb ponderació A (L_A)</i> i el <i>nivell efectiu de soroll percebut (EPNL)</i> efectivament converteixen els nivells sonors en nivells de soroll. Malgrat la conseqüent falta de rigor, els termes so i soroll de vegades s'utilitzen indistintament en aquest document, com en altres parts, sobretot en combinació amb la paraula <i>nivell</i> . |
| Corbes de nivell sonor / (isòfones) | Una línia del valor constant del nivell sonor / de soroll acumulat de les aeronaus al voltant d'un aeroport. |
| Impacte del soroll | Els efectes adversos del soroll en els receptors; les mètriques del soroll són indicadors de l'impacte del soroll. |
| Índex de soroll | Una mesura del so a llarg termini o acumulatiu que està relacionat amb (és a dir, es considera una variable explicativa de) els seus efectes adversos en les persones. Pot tenir en compte en certa mesura alguns factors a més de la magnitud del so (en particular l'hora del dia). N'és un exemple el nivell dia-tarda-nit <i>L_{DEN}</i> . |
| Nivell de soroll | Una mesura de so en decibels en una escala que indica la seva sonoritat o la seva sorollositat. En el cas del soroll ambiental originat per les aeronaus, se solen utilitzar dues escales: nivell sonor amb ponderació A i nivell de soroll percebut. Aquestes escales apliquen diferents ponderacions al so de diferents freqüències, a fi de simular la percepció humana. |
| Índex de soroll | Una expressió utilitzada per descriure qualsevol mesura de la quantitat de soroll en la posició d'un receptor, independentment que es tracti d'un únic esdeveniment o d'una acumulació de sorolls durant un temps prolongat. Hi ha dues mesures del soroll d'un únic esdeveniment que s'utilitzen habitualment: el nivell màxim assolit durant l'esdeveniment, o bé el seu nivell d'exposició al soroll, una mesura de la seva energia acústica total determinada per la integració temporal. |

| | |
|--|---|
| Dades/relacions soroll-potència distància (NPD) | Nivells sonors d'un esdeveniment tabulats en funció de la distància per sota d'un aeroplà en un vol de nivell constant a una velocitat de referència en una atmosfera de referència, per a cadascun dels -> <i>configuració de la potència del motor</i> . Les dades tenen en compte els efectes de l'atenuació acústica per propagació de l'ona esfèrica (llei de la inversa dels quadrats de la distància) i l'absorció atmosfèrica. La distància es defineix com a perpendicular a la trajectòria de vol de l'aeroplà i a l'eix aerodinàmic de l'ala de l'avió (és a dir, en vertical per sota de l'avió en vols sense balanceig). |
| Paràmetre de potència relacionada amb el soroll | Paràmetre que descriu o indica l'esforç de propulsió generat pel motor d'una aeronau amb el qual es pot relacionar de manera lògica l'emissió de potència acústica, que en general es denomina -> <i>impuls net corregit</i> . En aquest text, en general es denomina «potència» o «reglatge de la potència». |
| Significança del soroll | La contribució del segment de la trajectòria del vol és «significant des del punt de vista del soroll» si afecta el nivell de soroll de l'esdeveniment en la mesura que sigui apreciable. Ignorar els segments que no revesteixen importància des del punt de vista del soroll produeix estalvis massius en el processament per ordinador. |
| Observador | -> <i>Receptor</i> . |
| Etaques del procediment | Prescripció d'un perfil de vol (els passos inclouen canvis de velocitat o altitud). |
| Punt del perfil | Altura del punt final del segment de la trajectòria del vol (en un pla vertical sobre la trajectòria en terra). |
| Receptor | Un receptor del soroll que arriba des d'una font; principalment en un punt en la superfície del terreny o propera a aquesta. |
| Atmosfera de referència | Una tabulació de paràmetres d'absorció del soroll utilitzada per normalitzar les dades de NPD (vegeu l'apèndix D). |
| Dia de referència | Un conjunt de condicions atmosfèriques segons les quals es normalitzen les dades d'ANP. |
| Durada de referència | Un interval de temps nominal utilitzat per normalitzar les mesures del nivell d'exposició al soroll d'un únic esdeveniment; igual a 1 segon en el cas de -> <i>SEL</i> . |
| Velocitat de referència | Velocitat de l'aeroplà respecte al sòl segons la qual es normalitzen les dades SEL de -> <i>NPD</i> . |
| SEL | -> <i>Nivell d'exposició al soroll</i> . |
| Nivell d'exposició al soroll d'esdeveniment simple | El nivell de so que tindria un esdeveniment si tota la seva energia acústica es comprimís de manera uniforme en un interval de temps estàndard conegut com la -> <i>durada de referència</i> |

| | |
|--|--|
| Terreny tou | Una superfície del terreny que, en termes acústics, és «tova», en general el sòl cobert d'herba, que envolta la majoria dels aeròdroms. Les superfícies del terreny acústicament dures, és a dir, altament reflectores, inclouen el formigó i l'aigua. La metodologia d'obtenció de les corbes de soroll descrita aquí s'aplica a les condicions de superfícies toves. |
| So | Energia transmesa a través de l'aire mitjançant el moviment ondulatori (longitudinal) que és percebuda per l'oïda. |
| Atenuació acústica | La reducció de la intensitat del so amb la distància al llarg de la trajectòria de propagació. Entre les seves causes en el cas del soroll d'aeronaus destaquen la propagació ondulatoria esfèrica, l'absorció atmosfèrica i la -> <i>atenuació lateral</i> . |
| Exposició al soroll | Una mesura d'immissió d'energia acústica total durant un període de temps. |
| Nivell d'exposició al soroll, L_{AE} (acrònim SEL) | Una mètrica normalitzada en la ISO 1996-1 o en la ISO 3891 = Un nivell d'exposició al soroll d'un esdeveniment simple amb ponderació A amb referència a 1 segon. |
| Intensitat acústica | La intensitat de la immissió acústica en un punt es relaciona amb l'energia acústica (i indicada mitjançant nivells sonors mesurats). |
| Nivell sonor | Una mesura d'energia acústica expressada en unitats de decibel. El so rebut es mesura amb o sense «ponderació de freqüència»; els nivells mesurats amb una ponderació determinada sovint es denominen -> <i>nivells de soroll</i> |
| Longitud de l'etapa o del viatge | Distància fins a la primera destinació de l'aeronau que s'enlaira; es considera com un indicador del pes de l'aeronau. |
| Punt de partida de rodatge, SOR | El punt de la pista des del qual una aeronau comença a enlairar-se. També es denomina «alliberament del fre». |
| Velocitat real | Velocitat real de l'aeronau en relació amb l'aire (= velocitat respecte al sòl amb aire en calma). |
| Nivell de so continu equivalent corregit, $L_{eq,W}$ | Una versió modificada de L_{eq} en què s'assignen diferents ponderacions al soroll que es produeix durant diferents períodes del dia (normalment durant el dia, la tarda i la nit). |

Símbols

| | |
|-------|--|
| d | Distància més curta des d'un punt d'observació fins a un segment de la trajectòria del vol. |
| d_p | Distància perpendicular des d'un punt d'observació fins a la trajectòria de vol (distància obliqua). |
| d_i | Distància a escala |
| F_n | Impuls net real per motor |

| | |
|---------------|---|
| F_n/δ | Impuls net corregit per motor |
| h | Altitud de l'aeronau (per sobre de MSL) |
| L | Nivell de soroll de l'esdeveniment (escala indefinida) |
| $L(t)$ | Nivell sonor en l'interval de temps t (escala indefinida) |
| $L_A, L_A(t)$ | Un nivell de pressió sonora ponderat A (en l'interval de temps t), mesurat amb ponderació temporal <i>slow</i> |
| L_{AE} | (SEL) Nivell d'exposició al soroll |
| L_{Amax} | Valor màxim de $L_A(t)$ durant un esdeveniment |
| L_E | Nivell d'exposició al soroll d'esdeveniment simple |
| $L_{E\infty}$ | Nivell d'exposició al soroll d'esdeveniment simple determinat en la base de dades NPD |
| L_{EPN} | Nivell efectiu de soroll percebut |
| L_{eq} | Nivell sonor continu equivalent |
| L_{max} | Valor màxim de $L(t)$ durant un esdeveniment |
| $L_{max,seg}$ | Nivell màxim generat per un segment |
| L | Distància perpendicular des d'un punt d'observació fins a la trajectòria en terra |
| lg | Logaritme en base 10 |
| N | Nombre de segments o subsegments |
| NAT | Nombre d'esdeveniments en què L_{max} excedeix un llindar específic |
| P | Paràmetre de potència en la variable de NPD $L(P,d)$ |
| P_{seg} | Paràmetre de potència relatiu a un segment concret |
| Q | Distància des de l'inici del segment fins al punt d'aproximació màxima |
| R | Radi de gir |
| S | Desviació estàndard |
| s | Distància al llarg de la trajectòria en terra |
| S_{RWY} | Longitud de la pista |
| t | Temps |
| t_e | Durada efectiva d'un únic esdeveniment sonor |

| | |
|--|---|
| t_0 | Temps de referència per al nivell de so integrat |
| V | Velocitat respecte a terra |
| V_{seg} | Velocitat respecte a terra de segment equivalent |
| V_{ref} | Velocitat respecte a terra de referència per a la qual es defineixen les dades de NPD |
| x,y,z | Coordenades locals |
| x',y',z' | Coordenades de l'aeronau |
| $X_{\text{ARP}}, Y_{\text{ARP}}, Z_{\text{ARP}}$ | Posició del punt de referència de l'aeròdrom en coordenades geogràfiques |
| z | Altura de l'aeronau per sobre del pla de terra o del punt de referència de l'aeròdrom |
| α | Paràmetre utilitzat per calcular la correcció per al segment finit Δ_F |
| β | Angle d'elevació de l'aeronau respecte al pla de terra |
| ε | Angle de balanceig de l'aeronau |
| γ | Angle de pujada/baixada |
| ϕ | Angle de depressió (paràmetre de directivitat lateral) |
| λ | Longitud total del segment |
| ψ | Angle entre la direcció del moviment de l'aeronau i la direcció cap a l'observador |
| ξ | Rumb de l'aeronau, mesurat en el sentit de les agulles del rellotge des del nord magnètic |
| $\Lambda(\beta, \ell)$ | Atenuació lateral aire-terra |
| $\Lambda(\beta)$ | Atenuació lateral aire-terra a llarga distància |
| $\Gamma(\ell)$ | Factor de distància d'atenuació lateral |
| Δ | Canvi de valor d'una quantitat o una correcció (com s'indica en el text) |
| Δ_F | Correcció de segment finit |
| Δ_I | Correcció de la instal·lació del motor |
| Δ_i | Ponderació per al temps i durant el dia, en dB |
| Δ_{rev} | Inversa |
| Δ_{SOR} | Correcció del punt de partida de rodatge |
| Δ_V | Correcció de la durada (velocitat) |

Subíndexs

| | |
|------|--|
| 1, 2 | Subíndexs que denoten els valors inicials i finals d'un interval o segment |
| E | Exposició |
| i | Índex de la suma de categories/tipus d'aeronaus |
| j | Índex de la suma de la trajectòria en terra/subtrajectòria |
| k | Índex de la suma de segments |
| max | Màxim |
| ref | Valor de referència |
| seg | Valor específic del segment |
| SOR | En relació amb el punt de partida de rodatge |
| TO | Enlairament |

2.6.2. Marc de qualitat.

Precisió dels valors d'entrada.

Tots els valors d'entrada que afectin el nivell d'emissions d'una font, inclosa la posició de la font, s'han de determinar almenys amb una precisió corresponent a una incertesa de $\pm 2\text{dB(A)}$ en el nivell d'emissions de la font (deixant invariables tots els altres paràmetres).

Ús dels valors predeterminats.

Quan s'apliqui el mètode, les dades d'entrada han de reflectir l'ús real. En general, no s'utilitzen valors d'entrada predeterminats ni estimats. En particular, les trajectòries de vol s'obtenen de les dades de radar sempre que n'hi hagi i siguin de la qualitat suficient. S'accepten estimacions i valors d'entrada predeterminats, per exemple, per a rutes modelitzades que s'utilitzen en lloc de trajectòries de vol obtingudes per radar, si la recopilació de dades reals implica costos summament desproporcionats.

Qualitat del programari utilitzat per als càlculs.

El programari utilitzat per efectuar els càlculs ha d'acreditar la conformitat amb els mètodes aquí descrits mitjançant una certificació de resultats derivats dels assajos efectuats.

El programari utilitzat per calcular els nivells de soroll en l'ambient exterior ha de complir els requeriments que estableix la norma ISO 17534 pel que fa a qualitat i garantia de qualitat acústica i a les recomanacions generals per als assajos (test) i interface de control de qualitat, així com les recomanacions per a l'aplicació del control de qualitat en l'execució dels mètodes descrits en aquest annex pel programari d'acord amb la norma ISO 17534-1.

2.7. Soroll d'aeronaus.

2.7.1. Objectiu i àmbit d'aplicació del document.

Els mapes d'isòfones o corbes de nivell de soroll s'utilitzen per indicar l'abast i la magnitud de l'impacte del soroll d'aeronaus als aeroports, i aquest impacte s'indica mitjançant els valors d'un índex o una mètrica de soroll especificats. Una isòfona és una línia al llarg de la qual el valor de l'índex de soroll és constant. El valor d'índex té en compte tots els esdeveniments de soroll d'aeronaus individuals que ocorren durant algun període específic de temps, que se sol mesurar en dies o mesos.

El soroll en els punts sobre el terreny originat pel vol de les aeronaus que entren i surten d'un aeròdrom pròxim depèn de molts factors. Entre aquests, els principals són els tipus d'aeronau i el seu sistema motopropulsor; els procediments de gestió de la potència, els flaps i la velocitat aerodinàmica utilitzats en els aeroplans; les distàncies des dels punts afectats fins a les diferents trajectòries de vol; i les condicions meteorològiques i la topografia locals. Les operacions aeroportuàries en general inclouen diferents tipus d'avions, diversos procediments de vol i un rang de pesos operacionals.

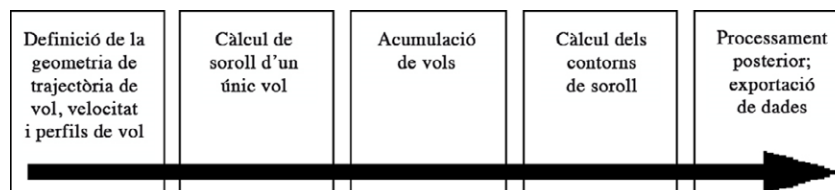
Les corbes de nivell de soroll es generen mitjançant el càlcul matemàtic dels valors de l'índex de soroll locals. En aquest document s'explica detalladament com calcular, en un punt d'observació, els nivells d'esdeveniments de soroll d'aeronaus individuals, cadascun d'ells per al vol d'una aeronau específica o un tipus de vol, dels quals posteriorment se'n fa la mitjana, o bé s'acumulen, per obtenir els valors de l'índex en el punt esmentat. Els valors requerits de l'índex de soroll s'obtenen mitjançant la repetició dels càlculs segons sigui necessari per a diferents moviments dels avions, procurant maximitzar l'eficiència exclouent esdeveniments que no «són significatius des del punt de vista del soroll» (és a dir, que no contribueixen significativament al soroll total).

Quan les activitats que generen sorolls associades amb operacions aeroportuàries no contribueixen substancialment a l'exposició global de la població al soroll d'aeronaus i a les corbes de nivell de soroll associades, aquestes es poden excloure. Aquestes activitats inclouen: helicòpters, rodatge, prova de motors i ús de fonts d'energia auxiliars. Això no significa necessàriament que el seu impacte sigui insignificant i, quan es donen aquestes circumstàncies, es pot fer una avaluació de les fonts, segons descriuen els apartats 2.7.21 i 2.7.22.

2.7.2. Esquema del document.

El procés de generació de les corbes de nivell de soroll s'il·lustra a la **figura 2.7.a**. Les isòfones s'obtenen per a diversos propòsits i tendeixen a controlar els requisits de les fonts i el tractament previ de les dades d'entrada. Les corbes de nivell de soroll que representen l'impacte històric del soroll s'han d'obtenir dels registres reals de les operacions de les aeronaus —de moviments, pesos, trajectòries de vol mesurades per radar, etc.—. Les corbes utilitzades per a la planificació de situacions depenen més de les previsions —de trànsit i trajectòries de vol i de les característiques de rendiment i soroll d'aeronaus futures—.

Figura 2.7.a
Procés de generació de les corbes de nivell de soroll



Independentment de la font de les dades de vol, cada moviment diferent de l'aeronau, arribada o sortida, es defineix en termes de la geometria de la trajectòria de vol i de l'emissió de soroll de l'aeronau a mesura que segueix la trajectòria esmentada (els moviments que són pràcticament iguals en termes de soroll i trajectòria de vol s'inclouen mitjançant una multiplicació senzilla). L'emissió de soroll depèn de les característiques de l'aeronau —principalment de la potència que generen els seus motors—. La metodologia recomanada implica dividir la trajectòria de vol en segments. Les **seccions 2.7.3 a 2.7.6** descriuen els elements de la metodologia i expliquen el principi de segmentació en què es basa; el nivell de soroll de l'esdeveniment observat és una agregació de les

contribucions de tots els segments «significatius des del punt de vista del soroll» de la trajectòria de vol, cadascun dels quals es pot calcular independentment de la resta. Les **seccions 2.7.3 a 2.7.6** també descriuen els requisits de les dades d'entrada per calcular un conjunt d'isòfones de soroll. Les especificacions detallades de les dades operatives necessàries es descriuen a l'**apèndix A**.

La manera com es calculen els segments de la trajectòria de vol a partir de les dades d'entrada processades prèviament es descriu a les **seccions 2.7.7 a 2.7.13**. Això implica l'aplicació d'anàlisis del rendiment (performance) del vol de l'aeronau, i les equacions per a això es detallen a l'**apèndix B**. Les trajectòries de vol estan subjectes a una variabilitat important —les aeronaus que segueixen qualsevol ruta es dispersen en ventall a causa dels efectes de les diferències en les condicions atmosfèriques, el pes de les aeronaus i els procediments de funcionament, les limitacions de control del trànsit aeri, etc. Això es té en compte mitjançant la descripció estadística de cada trajectòria de vol —com una trajectòria central o «principal» acompanyada d'un conjunt de trajectòries disperses—. Això també s'explica a les **seccions 2.7.7 a 2.7.13** amb referència a informació addicional que consta a l'**apèndix C**.

Les **seccions 2.7.14 a 2.7.19** descriuen els passos que és necessari seguir per calcular el nivell de soroll d'un únic esdeveniment —el soroll generat en un punt sobre el terreny pel moviment d'una aeronau—. L'**apèndix D** tracta la realització de nous càlculs de les dades de NPD per a condicions diferents de les de referència. L'**apèndix E** explica la font de dipol acústic utilitzada en el model per definir la radiació de so des dels segments de la trajectòria de vol de longitud finita.

Les aplicacions de les relacions de modelització descrites als capítols 3 i 4 requereixen, a part de les trajectòries de vol pertinents, dades apropiades sobre el soroll i el rendiment de l'aeronau en qüestió.

El càlcul fonamental consisteix a determinar el nivell de soroll de l'esdeveniment per a un únic moviment de l'aeronau en un únic punt d'observació. Això s'ha de repetir per a tots els moviments de l'aeronau en el conjunt de punts establert, i s'ha d'englobar l'abast esperat de les corbes de nivell de soroll requerides. En cada punt, s'agreguen els nivells de l'esdeveniment o es calcula una mitjana fins que s'assoleix un «nivell acumulatiu» o el valor de l'índex de soroll. Aquesta part del procés es descriu a les **seccions 2.7.20 i 2.7.23 a 2.7.25**.

Les **seccions 2.7.26 a 2.7.28** resumeixen les opcions i els requisits per vincular les corbes de nivell de soroll als valors de l'índex de soroll obtinguts per al conjunt de punts. També s'ofereix orientació sobre la generació de corbes de nivell i del processament posterior.

2.7.3. Concepte de segmentació.

Per a una aeronau específica, la base de dades conté relacions de soroll-potència-distància (NPD). Aquestes defineixen, per a un vol recte uniforme a una velocitat de referència en condicions atmosfèriques de referència i en una configuració de vol específica, els nivells dels esdeveniments, tant els màxims com els integrats en el temps, directament sota l'aeronau⁶ en funció de la distància. Als efectes de modelització del soroll, tota la potència de propulsió significativa es representa mitjançant un paràmetre de potència relacionat amb el soroll; el paràmetre que se sol utilitzar és l'impuls net corregit. Els nivells de soroll de l'esdeveniment inicials determinats a partir de la base de dades s'ajusten per representar, en primer lloc, les diferències entre les condicions atmosfèriques reals (és a dir, modelitzades) i les de referència i (en el cas dels nivells d'exposició al soroll) la velocitat de l'aeronau i, en segon lloc, per als punts del receptor que no estan directament sota l'aeronau, les diferències entre el soroll irradiat cap avall i lateralment. Aquesta última diferència es deu a la directivitat lateral (efectes d'instal·lació del motor) i a l'atenuació lateral. No obstant això, els nivells de soroll de l'esdeveniment ajustats es continuen referint només al soroll total de l'aeronau en vol uniforme.

La segmentació és el procés mitjançant el qual el model de càlcul de corbes de nivell de soroll recomanat adapta la relació de NPD de la trajectòria infinita i les dades laterals per calcular el soroll que arriba a un receptor des d'una trajectòria de vol no uniforme, és a dir, una al llarg de la qual varia la configuració del vol de l'aeronau. Per calcular el nivell de soroll de l'esdeveniment originat pel moviment d'una aeronau, la trajectòria del vol es representa mitjançant un conjunt de segments rectilinis continus, cadascun dels quals es pot considerar com una part finita d'una trajectòria infinita per a les quals es coneixen la relació de NPD i els ajustaments laterals. El nivell màxim de l'esdeveniment és senzillament el més alt dels valors dels segments individuals. El nivell integrat en el

⁶ En realitat, sota l'aeronau en perpendicular a l'eix aerodinàmic de l'ala i a la direcció del vol; es considera en vertical per sota l'aeronau en vol sense viratge (és a dir, sense balanceig).

temps de soroll total es calcula sumant el soroll rebut des d'un nombre suficient de segments, és a dir, els que fan una contribució significativa al soroll total de l'esdeveniment.

El mètode per estimar quan contribueix el soroll d'un segment finit al nivell del soroll total de l'esdeveniment integrat és purament empíric. La fracció de l'energia F —el soroll del segment expressat com una proporció del soroll de la trajectòria infinita total— es descriu mitjançant una expressió relativament senzilla basada en la directivitat longitudinal del soroll de l'aeronau i la «vista» del segment des del receptor. Una raó per la qual un mètode empíric senzill resulta convenient és que, per norma general, la major part del soroll procedeix del segment adjacent que sol estar més proper —el punt d'aproximació màxima (CPA) al receptor és dins del segment (i no en cap dels seus extrems)—. Això significa que els càlculs del soroll de segments no adjacents es poden aproximar cada vegada més a mesura que s'allunyen del receptor sense comprometre la precisió significativament.

2.7.4. Trajectòries del vol: pistes i perfils.

En el context de modelització, una ruta de vol (o trajectòria) és una descripció completa del moviment de l'aeronau en espai i temps.⁷ Juntament amb la tracció propulsiva (o un altre paràmetre de potència relacionat amb el soroll), constitueix la informació necessària per calcular el soroll generat. La trajectòria en terra és la projecció vertical de la trajectòria del vol a escala del terreny. Es combina amb el perfil de vol vertical per crear una trajectòria de vol en 3D. Per a la modelització de la segmentació és necessari descriure la trajectòria del vol de cada moviment diferent de l'aeronau mitjançant una sèrie de segments rectes contigus. La manera com s'efectua la segmentació depèn de la necessitat d'equilibrar la precisió i l'eficàcia —és necessari aproximar suficientment la trajectòria del vol corbada real alhora que es minimitzen els límits de càlcul i els requisits de dades—. És necessari definir cada segment mitjançant coordenades geomètriques dels seus punts finals i els paràmetres de la velocitat associada i la potència del motor de l'aeronau (dels quals depèn l'emissió de soroll). Les trajectòries dels vols i la potència del motor es poden determinar de diverses formes; la primera implica a) la síntesi d'una sèrie de passos procedimentals i b) l'anàlisi de les dades del perfil de vol mesurat.

Per a la síntesi de la trajectòria del vol (a) és necessari conèixer (o fer hipòtesis de) les trajectòries en terra i les seves dispersions laterals, els procediments de gestió de la velocitat, els flaps i l'impuls, l'elevació de l'aeroport i la temperatura del vent i de l'aire. Les equacions per calcular el perfil de vol a partir dels paràmetres aerodinàmics i de propulsió necessaris es faciliten a l'**apèndix B**. Cada equació conté coeficients (o constants) que es basen en dades empíriques per a cada tipus d'aeronau específic. Les equacions de rendiment aerodinàmic de l'**apèndix B** permeten considerar qualsevol combinació raonable del procediment del vol i del pes operacional de l'aeronau, incloses les operacions dels diferents pesos bruts d'enlairament.

L'anàlisi de les dades mesurades (b), per exemple, a partir dels registres de dades de vols, radars o altres equips de seguiment de l'aeronau, implica «enginyeria inversa», efectivament una inversió del procés de síntesi (a). En lloc de calcular els estats de l'aeronau i del sistema motopropulsor en els extrems dels segments del vol mitjançant la integració dels efectes de les forces d'impuls i aerodinàmiques que actuen sobre el fusellatge, les forces es calculen mitjançant la diferenciació dels canvis d'altura i velocitat del fusellatge. Els procediments per processar la informació de la trajectòria del vol es descriuen a la secció 2.7.12.

En una última aplicació de la modelització del soroll, cada vol individual, en teoria, es podria representar de manera independent; d'aquesta forma, es garantiria una comptabilització precisa de la dispersió espacial de les trajectòries de vols, un aspecte que pot ser molt important. No obstant això, per mantenir el temps d'utilització de l'ordinador i de preparació de les dades dins d'uns límits raonables, és una pràctica habitual representar l'alineament de la trajectòria del vol mitjançant un nombre reduït de «subtrajectòries» desplaçades lateralment. (La dispersió vertical normalment es representa satisfactòriament mitjançant el càlcul dels efectes de les masses variables de les aeronaus en els perfils verticals).

⁷ El temps es comptabilitza mitjançant la velocitat de l'aeronau.

2.7.5. Rendiment i soroll de les aeronaus.

La base de dades ANP tractada a l'apèndix I abraça la majoria dels tipus d'aeronaus existents. Si es tracta de tipus o variants d'aeronaus les dades de les quals no es faciliten actualment, es poden representar mitjançant les dades d'altres aeronaus que solen ser similars.

La base de dades ANP inclou «passos procedimentals» predeterminats per permetre la creació de perfils de vols almenys per a un procediment comú de sortida de reducció de sorolls. Les entrades més recents de la base de dades engloben dos procediments diferents de sortida de reducció de sorolls.

2.7.6. Operacions de l'aeroport i de les aeronaus.

Les dades específiques segons el cas a partir de les quals es calculen les corbes de nivell de soroll per a un escenari particular d'aeroport comprenen el següent:

Dades generals dels aeroports.

- El punt de referència de l'aeròdrom (només per situar l'aeròdrom en les coordenades geogràfiques apropiades). El punt de referència es defineix com l'origen del sistema local de coordenades cartesianes utilitzat en el procediment de càlcul.
- L'altitud de referència de l'aeròdrom (= altitud del punt de referència de l'aeròdrom). Es tracta de l'altitud del pla de terra nominal respecte al qual es determinen les corbes de nivell de soroll, en absència de correccions topogràfiques.
- Els paràmetres meteorològics mitjans en el punt de referència de l'aeròdrom o propers al punt esmentat (temperatura, humitat relativa, velocitat mitjana del vent i direcció del vent).

Dades de la pista.

Per a cada pista:

- Designació de la pista
- Punt de referència de la pista (centre de la pista expressat en coordenades locals)
- Gradient mitjà, direcció i longitud de la pista
- Ubicació del punt de partida de rodatge i líndar d'aterratge⁸

Dades de la trajectòria en terra.

Les trajectòries en terra de l'aeronau s'han de descriure mitjançant una sèrie de coordenades en el pla de terra (horitzontal). La font de dades de les trajectòries en terra depèn de si les dades de radar pertinents estan disponibles o no. Si ho estan, és necessari establir una trajectòria principal fiable i les subtrajectòries associades adequades (disperses) mitjançant anàlisis estadístiques de les dades. En canvi, si no estan disponibles, les trajectòries principals se solen crear a partir d'informació procedimental apropiada, per exemple, mitjançant la utilització de procediments de sortida normalitzats per instruments que consten en les publicacions d'informació aeronàutica. Aquesta descripció convencional inclou la informació següent:

- Designació de la pista des de la qual s'origina la trajectòria
- Descripció de l'origen de la trajectòria (punt de partida de rodatge i líndar d'aterratge)
- Longitud dels segments (per a girs, radis i canvis de direcció)

⁸ Els líndars desplaçats es poden tenir en compte mitjançant la definició de pistes addicionals.

Aquesta informació constitueix el mínim necessari per definir la trajectòria principal. No obstant això, els nivells mitjans de soroll calculats sobre el supòsit que l'aeronau segueix estrictament les rutes nominals poden ser responsables d'errors localitzats de diversos decibels. Per tant, s'ha de representar la dispersió lateral, i és necessària la informació addicional següent:

- Amplada de la banda de dispersió (o una altra estadística de dispersió) en cada extrem del segment
- Nombre de subtrajectòries
- Distribució de moviments perpendiculars a la trajectòria principal

Dades del trànsit aeri.

Les dades del trànsit aeri són:

- el període de temps cobert per les dades, i
- el nombre de moviments (arribades o sortides) de cada tipus d'aeronau en cada trajectòria de vol, subdividit per 1) el període del dia, segons que correspongui, apropiat als descriptors de soroll específics, 2) per a sortides, pesos operatius o longituds de les etapes, i 3) procediments operatius, si escau.

La majoria dels descriptors de soroll requereixen que els esdeveniments (és a dir, els moviments de l'aeronau) es defineixin com a valors diaris mitjans durant els períodes específics del dia (per exemple, el dia, la tarda i la nit); vegeu les seccions 2.7.23 a 2.7.25.

Dades topogràfiques.

El terreny que envolta la majoria dels aeroports és relativament pla. No obstant això, no sempre ho és, i de vegades pot ser necessari tenir en compte les variacions de l'elevació del terreny en relació amb l'elevació de referència de l'aeroport. L'efecte de l'elevació del terreny pot ser particularment important en les proximitats de les rutes d'aproximació, on l'aeronau opera a altituds relativament baixes.

Les dades de l'elevació del terreny se solen facilitar com un conjunt de coordenades (x,y,z) per a una malla rectangular d'un pas de malla determinat. No obstant això, és probable que els paràmetres de la malla d'elevació difereixin dels de la malla utilitzada per calcular el soroll. Si s'escau, es pot utilitzar una interpolació lineal per calcular les coordenades z apropiades a la malla de càlcul.

L'anàlisi integral dels efectes del terreny amb desnivells marcats en la propagació sonora és complexa i està fora de l'abast d'aquest mètode. La irregularitat moderada es pot tenir en compte suposant un terreny «pseudonivell»; és a dir, simplement augmentant o reduint el nivell del pla de terra a l'elevació del terreny local (en relació amb el pla de terra de referència) en cada punt del receptor (vegeu la secció 2.7.4).

Condicions de referència.

Les dades internacionals de rendiment i soroll de l'aeronau (ANP) es normalitzen per a condicions de referència estàndard que s'utilitzen àmpliament per a estudis de soroll en aeroports (vegeu l'**apèndix D**).

Condicions de referència per a les dades de NPD.

- 1) Pressió atmosfèrica: 101,325 kPa (1.013,25 mb)
- 2) Absorció atmosfèrica: paràmetres d'atenuació enumerats en el **quadre D-1** de l'**apèndix D**
- 3) Precipitacions: cap
- 4) Velocitat del vent: menys de 8 m/s (15 nusos)
- 5) Velocitat respecte a terra: 160 nusos
- 6) Terreny local: superfície plana i suau sense estructures grans ni altres objectes reflectors dins d'un radi de diversos quilòmetres de les trajectòries en terra de les aeronaus.

Les mesures estandarditzades del so de l'aeronau s'efectuen a 1,2 m per sobre de la superfície del terreny. No obstant això, no hi cal prestar especial atenció ja que, als efectes de modelització, es pot assumir que els nivells dels esdeveniments són relativament insensibles a l'altura del receptor.⁹

Les comparacions entre els nivells de soroll de l'aeroport calculats i mesurats indiquen que es pot suposar que les dades de NPD són aplicables quan les condicions mitjanes de la superfície pròxima presenten les característiques següents:

- Temperatura de l'aire inferior a 30 °C
- Producte de la temperatura de l'aire (°C) i humitat relativa (percentatge) superior a 500
- Velocitat del vent inferior a 8 metres per segon (15 nusos)

S'estima que aquestes característiques engloben les condicions que es troben en la majoria dels principals aeroports del món. L'**apèndix D** ofereix un mètode per convertir les dades de NPD en condicions mitjanes locals que estan fora d'aquest rang, però en casos extrems se suggereix consultar als fabricants corresponents de l'aeronau.

Condicions de referència per a les dades del motor i l'aerodinàmica de l'aeronau.

- 1) Elevació de la pista: nivell mitjà del mar
- 2) Temperatura de l'aire: 15 °C
- 3) Pes brut en l'enlairament: com es defineix en funció de la longitud de l'etapa en la base de dades d'ANP
- 4) Pes brut en l'aterratge: 90% del pes brut màxim en aterratge
- 5) Motors amb impuls: tots

Malgrat que les dades del motor i aerodinàmiques d'ANP es basen en aquestes condicions, es poden utilitzar com a tabulades aquestes per a elevacions de la pista diferents de les de referència i mitjanes de les temperatures mitjanes de l'aire en els estats del CEAC sense afectar significativament la precisió de les corbes dels nivells mitjans de soroll acumulats. (Vegeu l'**apèndix B**).

La base de dades d'ANP tabula les dades aerodinàmiques per als pesos bruts d'enlairament i aterratge que s'indiquen als punts 3 i 4 anteriors. Malgrat que, per a càlculs del soroll total acumulat, les dades aerodinàmiques s'han d'ajustar per a altres pesos bruts, el càlcul dels perfils del vol en l'enlairament i l'ascens, utilitzant els procediments que descriu l'**apèndix B**, s'han de basar en els pesos bruts de l'enlairament operatiu apropiats.

2.7.7. Descripció de la trajectòria del vol.

El model de soroll requereix que cada moviment diferent de l'aeronau es descrigui mitjançant la seva trajectòria de vol tridimensional i la potència variable del motor i la seva velocitat. Com a norma, un moviment modelitzat representa un subconjunt del trànsit total de l'aeroport, per exemple, un nombre de moviments idèntics (assumits com a tals), amb el mateix tipus d'aeronau, pes i procediment operatiu, sobre una única trajectòria en terra. Aquesta trajectòria pot ser una de diverses «subtrajectòries» disperses utilitzades per modelitzar el que realment és una dispersió de trajectòries seguint una ruta designada. Les dispersions de la trajectòria en terra, els perfils verticals i els paràmetres operatius de l'aeronau es determinen a partir de les dades de l'escenari d'entrada, juntament amb les dades de l'aeronau extretes de la base de dades d'ANP.

Les dades de soroll-potència-distància (en la base de dades d'ANP) defineixen el soroll procedent d'una aeronau que recorre trajectòries de vol horitzontals idealitzades de longitud infinita a una potència i velocitat constants. Per adaptar aquestes dades a les trajectòries de vol de l'àrea terminal caracteritzades per canvis freqüents de potència

⁹ De vegades es demanen nivells calculats a 4 m o més. La comparació de les mesures a 1,2 m i a 10 m i el càlcul teòric dels efectes de sòl revelen que les variacions del nivell d'exposició al soroll amb ponderació A són relativament insensibles a l'altura del receptor. Les variacions solen ser inferiors a un decibel, excepte si l'angle màxim de la incidència de so és inferior a 10° i si l'espectre ponderat A en el receptor té el seu nivell màxim dins del rang comprès entre 200 Hz i 500 Hz. Aquesta variabilitat dominada per una baixa freqüència es pot produir, per exemple, a llargues distàncies per a motors amb una relació de derivació baixa i per a motors d'hèlix amb tons de freqüència baixa discrets.

i velocitat, cada trajectòria es divideix en segments rectilinis finits; les contribucions de soroll de cadascun d'aquests se sumen posteriorment en la posició de l'observador.

2.7.8. Relacions entre la trajectòria del vol i la configuració del vol.

La trajectòria del vol tridimensional del moviment d'una aeronau determina els aspectes geomètrics de la radiació i la propagació del so entre l'aeronau i l'observador. Amb un pes particular i en condicions atmosfèriques particulars, la trajectòria del vol es regeix completament mitjançant la seqüència de potència, flaps i canvis d'altitud aplicats pel pilot (o sistema de gestió automàtica del vol), a fi de seguir rutes i mantenir les altures i velocitats especificades pel control de trànsit aeri (CTA), en virtut dels procediments operatius estàndard de l'operador d'aeronaus. Aquestes instruccions i accions divideixen la trajectòria del vol en diferents fases que conformen els segments naturals. En el pla horitzontal, impliquen trams rectes, especificats com una distància fins al proper gir i els propers girs, definida pel radi i el canvi de rumb. En el pla vertical, els segments es defineixen mitjançant el temps o la distància considerats per aconseguir els canvis necessaris de velocitat d'avanç o altura en els ajustaments de flaps i potència especificats. Sovint, les coordenades verticals corresponents es denominen *punts de perfil*.

Per a la modelització del soroll, es genera informació sobre la trajectòria del vol mitjançant la síntesi d'un conjunt de passos procedimentals (és a dir, els que segueix el pilot) o mitjançant l'anàlisi de les dades dels radars —mitjanes físiques de les trajectòries de vol reals en l'aire—. Independentment del mètode que s'utilitzi, les formes horitzontals i verticals de la trajectòria de vol es redueixen a formes segmentades. La seva forma horitzontal (és a dir, la seva projecció bidireccional sobre el sòl) és la trajectòria en terra definida per l'itinerari entrant i sortint. La seva forma vertical, obtinguda mitjançant els punts de perfil, i els paràmetres de vol associats de velocitat, angle de balanceig i reglatge de la potència, en conjunt defineixen el perfil del vol que depèn del procediment del vol que sol prescriure el fabricant de l'aeronau o l'operador. La trajectòria del vol es crea mitjançant la fusió del perfil del vol bidimensional amb la trajectòria en terra bidimensional per formar una seqüència de segments de la trajectòria del vol tridimensional.

Cal recordar que, per a un conjunt de passos procedimentals determinat, el perfil depèn de la trajectòria en terra; per exemple, amb el mateix impuls i a la mateixa velocitat, la velocitat d'ascens en inferior, al seu torn, que el vol en línia recta. Encara que en aquest document s'explica com tenir en compte aquesta dependència, és necessari reconèixer que això suposaria, per norma general, una sobrecàrrega excessiva de càlcul i els usuaris poden preferir assumir que, als efectes de modelització del soroll, el perfil del vol i la trajectòria en terra es poden tractar com a entitats independents, és a dir que el perfil d'ascens no es veu afectat per cap gir. No obstant això, és important determinar els canvis de l'angle de balanceig que els girs necessiten, perquè això influeix significativament en la direccionalitat de l'emissió de so.

El soroll rebut des d'un segment de la trajectòria del vol depèn de la geometria del segment en relació amb l'observador i la configuració del vol de l'aeronau. Però aquests paràmetres estan interrelacionats; de fet, un canvi en un causa un canvi en l'altre, i és necessari garantir que, en tots els punts de la trajectòria, la configuració de l'aeronau està en consonància amb el seu moviment al llarg de la trajectòria.

En la síntesi de la trajectòria d'un vol, és a dir, quan es crea la trajectòria d'un vol a partir d'un conjunt de «passos procedimentals» que descriuen les seleccions que el pilot efectua de la potència del motor, l'angle dels flaps i la velocitat vertical o d'acceleració, el que s'ha de calcular és el moviment. En l'anàlisi de la trajectòria d'un vol, es dona el cas contrari: és necessari calcular la potència del motor a partir del moviment observat de l'aeronau, segons les dades del radar o, de vegades, en estudis especials, a partir de les dades del registrador del vol de l'aeronau (encara que en l'últim cas, la potència del motor sol formar part de les dades). En els dos casos, les coordenades i els paràmetres del vol en tots els punts finals del segment s'han d'introduir en el càlcul del soroll.

L'**apèndix B** presenta les equacions que relacionen les forces que actuen sobre una aeronau i el seu moviment i explica com es resolen per definir les propietats dels segments que conformen les trajectòries dels vols. Els diferents tipus de segments (i les seccions de l'**apèndix B** en què es tracten) són *l'impuls en terra en l'enlairament* (B5), *l'ascens a una velocitat constant* (B6), *l'acceleració en ascens i la retracció dels flaps* (B8), *l'acceleració en ascens després de la retracció dels flaps* (B9), *el descens i la desacceleració* (B10) i *aproximació final d'aterratge* (B11).

Inevitablement, la modelització pràctica implica graus variables de simplificació —el requisit per a això depèn de la naturalesa de l'aplicació del mètode, de la importància dels resultats i dels recursos disponibles—. Un supòsit simplificat general, fins i tot en les aplicacions més elaborades, és que, quan es calcula la dispersió de la trajectòria del vol, els perfils i les configuracions del vol en totes les subtrajectòries són els mateixos que els de la trajectòria

principal. Com que s'han d'utilitzar almenys 6 subtrajectòries (vegeu la secció 2.7.11), això redueix els càlculs massius que impliquen una penalització summament petita en termes de confiança.

2.7.9. Fonts de les dades de les trajectòries de vols.

Dades de radars.

Encara que els registradors de dades de vols d'aeronaus poden generar dades d'una qualitat molt alta, és difícil obtenir-les als efectes de modelització del soroll, per la qual cosa les dades dels radars es poden considerar com la font d'informació de més fàcil accés sobre les trajectòries de vol reals en l'aire en els aeroports.¹⁰ Tenint en compte que solen estar disponibles en els sistemes de supervisió de la trajectòria del vol i del soroll en els aeroports, actualment s'utilitzen cada vegada més als efectes de modelització del soroll.

El radar secundari de vigilància presenta la trajectòria de vol d'una aeronau com una seqüència de coordenades de posició a intervals iguals al període de rotació de l'escàner de radar, normalment al voltant de 4 segons. La posició de l'aeronau respecte al sòl es determina en coordenades polars —distància i azimut— a partir dels senyals de retorn de radar reflectits (encara que el sistema de control les sol transformar en coordenades cartesianes); la seva altura¹¹ es mesura per mitjà de l'altímetre propi de l'avió i es transmet a l'ordinador de control del trànsit aeri mitjançant un transponedor de radar. No obstant això, els errors de posició inherents per la interferència de radiofreqüències i la resolució de dades limitades són importants (malgrat que no té cap conseqüència per a les finalitats previstes de control del trànsit aeri). Per tant, si és necessari conèixer la trajectòria del vol del moviment d'una aeronau específica, és necessari suavitzar les dades mitjançant una tècnica apropiada per a l'ajust de corbes. No obstant això, als efectes de modelització del soroll, sol ser necessari efectuar una descripció estadística de la dispersió de les trajectòries dels vols; per exemple, per a tots els moviments d'una ruta o només per als d'un tipus d'aeronau específica. En aquest àmbit, els errors de mesuraments associats amb les estadístiques corresponents es poden reduir fins a ser irrelevantes mitjançant processos de determinació de la mitjana.

Etaques del procediment.

En molts casos, no és possible modelitzar les trajectòries dels vols en funció de les dades del radar, perquè no estan disponibles els recursos necessaris, o bé perquè es tracta d'un escenari futur per al qual les dades de radar que són pertinents no estan disponibles.

A manca de dades de radar, o quan el seu ús és inapropiat, és necessari calcular les trajectòries dels vols segons el material guia operatiu, per exemple les instruccions que es donen al personal del vol en les publicacions d'informació aeronàutica (AIP) i en manuals de funcionament de l'aeronau, el que aquí es denominen etapes del procediment. Quan sigui procedent, les autoritats de control del trànsit aeri i els operadors de l'aeronau han de proporcionar assessorament sobre com interpretar aquest material.

2.7.10. Sistemes de coordenades.

Sistema de coordenades local.

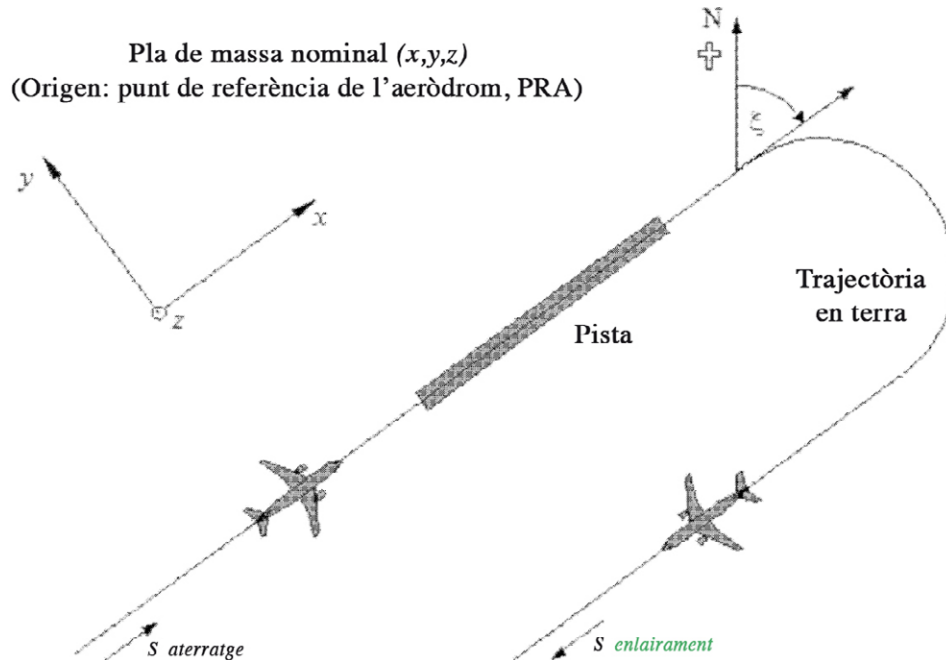
El sistema de coordenades locals (x,y,z) és el cartesià i té el seu origen $(0,0,0)$ en el punt de referència de l'aeròdrom $(X_{ARP}, Y_{ARP}, Z_{ARP})$, on Z_{ARP} és l'altitud de referència de l'aeroport i $z = 0$ defineix el pla del terreny nominal sobre el qual se solen calcular les corbes de nivell de soroll. El rumb de l'aeronau ξ en el pla xy es mesura en el sentit de les agulles del rellotge a partir del nord magnètic (vegeu la **figura 2.7.b**). Totes les ubicacions de l'observador, la malla de càlcul bàsica i els punts s'expressen en coordenades locals.¹²

¹⁰ Els registradors de dades de vols d'aeronaus ofereixen dades d'operació integrals. No obstant això, no són de fàcil accés i la seva disponibilitat és costosa; per tant, el seu ús als efectes de modelització del soroll se sol restringir a estudis per al desenvolupament de models i projectes especials.

¹¹ En general, això es mesura com a altitud sobre MSL (és a dir, en relació amb 1.013 mB) i es corregeix respecte a l'elevació de l'aeroport mitjançant el sistema de supervisió de l'aeroport.

¹² Normalment, els eixos de les coordenades locals són paral·lels a l'eix del mapa en què es dibuixen les isòfones. No obstant això, de vegades és útil triar l'eix x paral·lel a una pista, a fi d'obtenir corbes simètriques sense utilitzar una malla de càlcul fina (vegeu les **seccions 2.7.26 a 2.7.28**).

Figura 2.7.b
Sistema de coordenades locals (x,y,z) i coordenades fixes de la trajectòria en terra



Sistema de coordenades fixes de la trajectòria en terra.

Aquesta coordenada és específica de cada trajectòria en terra i representa la distància s mesurada al llarg de la trajectòria en la direcció del vol. En les trajectòries d'enlairament, S es mesura des de l'inici del rodolament i, en el cas de les trajectòries d'aterratge, des del llindar d'aterratge. Per tant, S és negatiu en les zones següents:

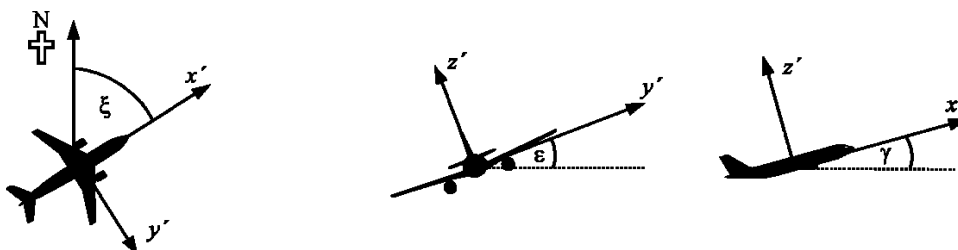
- darrere del punt de partida de rodatge en les sortides;
- abans de creuar el llindar d'aterratge en pista per a les arribades.

Els paràmetres operatius del vol, com ara l'altura, la velocitat i el reglatge de la potència, s'expressen en funció de s .

Sistema de coordenades de l'avió.

El sistema de coordenades cartesianes fixes de l'avió (x',y',z') té el seu origen en la ubicació real de l'avió. El sistema axial es defineix mitjançant l'angle de pujada γ , la direcció del vol ξ i l'angle de balanceig ϵ (vegeu la figura 2.7.c).

Figura 2.7.c
Sistema de coordenades fixes de l'avió (x',y',z')



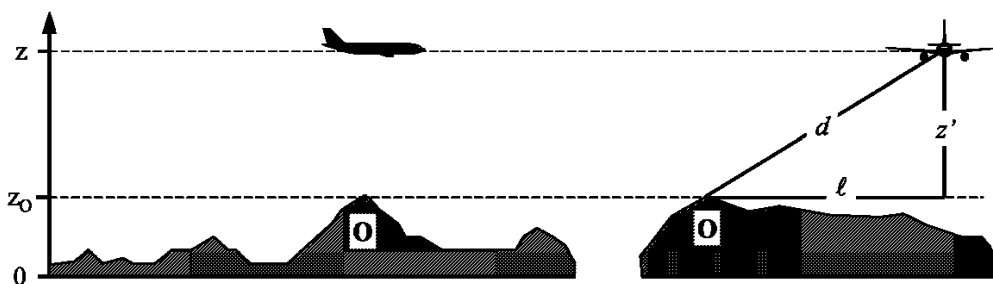
Consideració de la topografia.

En els casos en què és necessari tenir en compte la topografia (vegeu la secció 2.7.6), és necessari reemplaçar la coordenada de l'altura de l'avió z per $z' = z - z_0$ (on z_0 , la coordenada z és la ubicació de l'observador O) quan es calcula la distància de propagació d . La geometria entre l'avió i l'observador s'il·lustra a la **figura 2.7.d**. Per consultar les definicions de d i ℓ , vegeu les seccions 2.7.14 a 2.7.19.¹³

Figura 2.7.d

Elevació del terreny a l'(esquerra) i en el lateral (dret) de la trajectòria en terra

(El pla de terra nominal $z = 0$ passa a través del punt de referència de l'aeròdrom. O és la ubicació de l'observador)



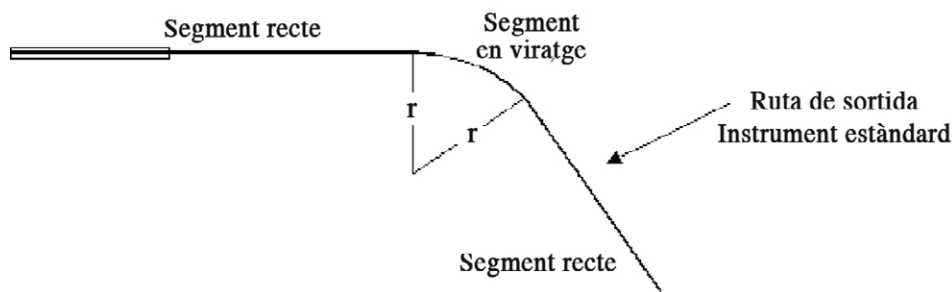
2.7.11. Trajectòries en terra.

Trajectòries principals.

La trajectòria principal defineix el centre de la banda de dispersió de les trajectòries que segueix l'avió amb una ruta. Als efectes de modelització del soroll de l'avió, es defineix i) mitjançant dades operatives prescriptives, com les instruccions que es donen als pilots en les publicacions d'informació aeronàutica o ii) mitjançant anàlisis estadístiques de les dades de radar, tal com s'explica a la secció 2.7.9, quan estiguin disponibles i siguin convenients per satisfer les necessitats de l'estudi de modelització. Crear la trajectòria a partir d'instruccions operatives sol ser una tasca força senzilla, ja que aquestes prescriuen una seqüència de trams rectes —definites per la longitud i el rumb— o arcs circulars definits per la velocitat de viratge i el canvi de rumb; vegeu la **figura 2.7.e** per consultar una il·lustració.

Figura 2.7.e

Geometria de la trajectòria en terra en termes de viratges i segments rectes



¹³ En terrenys desnivellats pot ser possible que l'observador se situï per sobre de l'aeronau. En aquest cas, per calcular la propagació sonora, es considera z' (i el corresponent angle d'elevació β —vegeu el capítol 4) igual a zero.

Adequar la trajectòria principal a les dades de radar és una tasca més complexa, en primer lloc perquè es fan viratges reals a una velocitat variable i, en segon lloc, perquè la seva línia s'enfosqueix per la dispersió de les dades. Com bé s'ha explicat, encara no s'han desenvolupat procediments formalitzats i és una pràctica habitual associar segments, ja siguin rectes o corbats, amb les posicions mitjanes calculades a partir dels talls transversals de les línies de seguiment per radar a intervals al llarg de la ruta. És possible que els algorismes informàtics necessaris per executar aquesta tasca es desenvolupin en un futur, però, de moment, competeix al modelista decidir quina és la millor manera d'utilitzar les dades disponibles. Un factor important és que la velocitat de l'avió i el radi de viratge indiquen l'angle de balanceig i, com es pot observar a la secció 2.7.19, les asimetries de la radiació sonora al voltant de la trajectòria del vol influeixen en el soroll en terra, així com la posició de la trajectòria del vol.

En teoria, la transició perfecta des del vol recte al viratge de radi fix requeriria una aplicació instantània de l'angle de balanceig ϵ , que físicament és impossible. En realitat, l'angle de balanceig triga un temps determinat a assolir el valor requerit per mantenir una velocitat específica i el radi de viratge r , durant el qual el radi de viratge s'ajusta d'infinít a r . Als efectes de modelització, es pot ignorar la transició del radi i es pot suposar que l'angle de balanceig augmenta constantment des de zero (o un altre valor inicial) fins a ϵ a l'inici del viratge i ser el proper valor de ϵ al final del viratge.¹⁴

Dispersió de la trajectòria.

Quan sigui possible, les definicions de la dispersió lateral i de les subtrajectòries representatives s'han de basar en experiències passades pertinents de l'aeroport objecte d'estudi; normalment, a través de l'anàlisi de les mostres de dades de radar. El primer pas consisteix a agrupar les dades per ruta. Les vies de sortida es caracteritzen per una dispersió lateral substancial que s'ha de tenir en compte per efectuar una modelització precisa. Les rutes d'arribada s'uneixen en una banda molt estreta sobre la ruta d'aproximació final, i n'hi sol haver prou amb representar totes les arribades mitjançant una única trajectòria. No obstant això, si les dispersions en l'aterratge són àmplies, és possible que sigui necessari representar-les mitjançant subtrajectòries de la mateixa manera que les rutes de sortida. És una pràctica comuna tractar les dades (informació) per a una única ruta com una mostra d'una única població (estadística); és a dir, efectuar la representació mitjançant una trajectòria principal i un conjunt de subtrajectòries disperses. No obstant això, si la inspecció indica que les dades de les diferents categories d'avions o operacions difereixen significativament (per exemple, en cas que un avió gran i petit tingui radis de viratge força diferents), seria convenient efectuar una altra subdivisió de les dades en diferents bandes de dispersió. Per a cada banda, les dispersions de la trajectòria lateral es determinen en funció de la distància a partir de l'origen; llavors els moviments es distribueixen entre una trajectòria principal i un nombre apropiat de subtrajectòries disperses en funció de les estadístiques de distribució.

Tenint en compte que sol ser convenient ignorar els efectes de la dispersió de la trajectòria, davant l'absència de dades de bandes de dispersió mesurades, s'ha de definir una dispersió lateral a la trajectòria principal i perpendicular a aquesta mitjançant una funció de distribució convencional. Els valors calculats dels índexs de soroll no són particularment sensibles a la forma precisa de la distribució lateral: la distribució normal (de Gauss) ofereix una descripció adequada de bandes de dispersió mesurades per radar.

Normalment s'utilitza una aproximació discreta de set punts (és a dir, que representa la dispersió lateral mitjançant sis subtrajectòries amb la mateixa separació al voltant de la trajectòria principal). La separació de les subtrajectòries depèn de la desviació estàndard de la funció de dispersió lateral.

En el cas de les trajectòries amb una distribució normal i una desviació estàndard S , el 98,8% de les trajectòries es troben dins d'un corredor amb límits ubicat a $\pm 2,5 \times S$. El **quadre 2.7.a** indica la separació de les sis subtrajectòries i el percentatge dels moviments totals assignat a cada una. L'**apèndix C** ofereix els valors per als altres números de subtrajectòries.

¹⁴ Competeix a l'usuari decidir quina és la millor manera d'aplicar aquesta qüestió, ja que això depèn de la manera com es defineixin els radis de viratge. Quan el punt de partida és una seqüència de trams circulars o rectes, una opció relativament senzilla és inserir els segments de transició de l'angle de balanceig a l'inici del viratge i al final, on l'avió roda a una velocitat constant (per exemple, expressada en $^{\circ}/m$ o $^{\circ}/s$).

Quadre 2.7.a
Percentatges de moviments per a una funció de distribució normal amb una desviació estàndard S per a set subtrajectòries (la trajectòria principal és la subtrajectòria 1)

| Número de subtrajectòria | Ubicació de la subtrajectòria | Percentatge de moviments en la subtrajectòria |
|--------------------------|-------------------------------|---|
| 7 | $-2,14 \times S$ | 3% |
| 5 | $-1,43 \times S$ | 11% |
| 3 | $-0,71 \times S$ | 22% |
| 1 | 0 | 28% |
| 2 | $0,71 \times S$ | 22% |
| 4 | $1,43 \times S$ | 11% |
| 6 | $2,14 \times S$ | 3% |

La desviació estàndard S és una funció de la coordenada s al llarg de la trajectòria principal. Es pot especificar — juntament amb la descripció de la trajectòria principal— a la fitxa de dades de la trajectòria del vol que figura a l'**apèndix A3**. Davant l'absència dels indicadors de la desviació normal —per exemple, a partir de les dades de radar que descriuen trajectòries de vol comparables—, es recomanen els valors següents:

Per a trajectòries que impliquen viratges de menys de 45 graus:

$$S(s) = 0,055 * s - 150 \quad \text{per a } 2.700 \text{ m} \leq s \leq 30.000 \text{ m}$$

$$S(s) = 1.500 \quad \text{per a } > 30.000 \text{ m} \quad (2.7.1)$$

Per a trajectòries que impliquen viratges de més de 45 graus:

$$S(s) = 0,128 * s - 420 \quad \text{per a } 3.300 \text{ m} \leq s \leq 15.000 \text{ m} \quad (2.7.2)$$

$$S(s) = 1.500 \text{ m} \quad \text{per a } > 15.000 \text{ m}$$

Per qüestions pràctiques, s'assumeix el valor 0 per a $S(s)$ entre el punt de partida de rodatge i $s = 2.700$ m o $s = 3.300$ m, en funció de la quantitat de viratges. Les rutes que comprenen més d'un viratge s'han de tractar en funció de l'equació (2.7.2). Per als aterratges, es pot obviar la dispersió lateral dins dels 6.000 m de la presa de contacte.

2.7.12. Perfils de vols.

El perfil del vol és una descripció del moviment de l'avió en el pla vertical per sobre de la trajectòria en terra, en termes de la seva posició, velocitat, angle de balanceig i reglatge de la potència del motor. Una de les tasques més importants que ha d'efectuar l'usuari del model és la definició de perfils de vol que satisfacin correctament els requisits de l'aplicació de la modelització, d'una manera eficient i sense utilitzar gaire temps ni massa recursos. Naturalment, per aconseguir una precisió alta, els perfils han de reflectir fidelment les operacions de l'avió que pretenen representar. Per a això es requereix informació fiable sobre les condicions atmosfèriques, els tipus d'avió i les versions, pesos operatius (o d'operació) i procediments operatius (o d'operació) —les variacions d'impuls i configuració dels flaps i compensacions entre canvis d'altitud i velocitat—, calculant la mitjana de tots els factors respecte als períodes de temps pertinents. Sovint, no hi ha disponible informació detallada, però això no planteja necessàriament un obstacle; fins i tot encara que sí que estiguin disponibles, el modelista ha de trobar l'equilibri entre la precisió i el nivell de detall de la informació d'entrada que necessita i utilitza per obtenir les corbes de nivell de soroll.

La síntesi dels perfils de vols de les «etapes del procediment» obtinguts de la base de dades d'ANP o que proporcionen els operadors de l'avió es descriu a la secció 2.7.13 i a l'**apèndix B**. Aquest procés, que sol ser l'únic recurs disponible per al modelista quan no hi ha dades de radar disponibles, ofereix la geometria de la trajectòria del vol i les variacions d'impuls i velocitat associats. Normalment es pot assumir que tots els avions (iguals) d'una determinada banda de dispersió, independentment que estiguin assignats a la trajectòria principal o a subtrajectòries disperses, segueixen el perfil de la trajectòria principal.

Més enllà de la base de dades d'ANP, que ofereix informació predeterminada sobre les etapes del procediment, els operadors de l'avió constitueixen la millor font d'informació fiable, és a dir, els procediments que utilitzen i els típics pesos volats. Per als vols individuals, la font «tipus de referència» és el registrador de les dades del vol de l'avió (FDR) del qual es pot obtenir tota la informació pertinent. Però encara que aquestes dades estiguin disponibles, la tasca de preprocessament és formidable. Per tant, i tenint en compte les economies de modelització necessàries, la solució pràctica comuna és fer hipòtesis contrastades sobre pesos mitjans i els procediments operatius.

És necessari tenir precaució abans d'adoptar les etapes predeterminades del procediment establertes en la base de dades d'ANP (que s'assumeixen habitualment quan els procediments reals no es coneixen). Es tracta de procediments normalitzats àmpliament observats, que els operadors poden o no utilitzar en casos particulars. Un factor important és la definició de l'impuls del reactor en l'enlairament (i de vegades en l'ascens), que pot dependre en certa mesura de circumstàncies imperants. En particular, és una pràctica comuna reduir els nivells d'impuls durant l'enlairament (a partir del màxim disponible), a fi d'ampliar la vida útil del motor. L'**apèndix B** ofereix orientació sobre la representació de la pràctica habitual; en general, això genera corbes de nivell de soroll més realistes que la hipòtesi d'un impuls total. No obstant això, si, per exemple, les pistes són curtes o les temperatures mitjanes de l'aire són altes, l'impuls total podria constituir una hipòtesi més realista.

Quan es modelitzen escenaris reals, es pot aconseguir més precisió amb les dades de radar, a fi de complementar o reemplaçar aquesta informació nominal. Els perfils de vols es poden determinar a partir de les dades de radar d'una manera similar a la de les trajectòries principals laterals —però només després de separar el trànsit per tipus i variant d'avió i, de vegades, per pes o longitud de l'etapa (però no en funció de la dispersió)— a fi d'obtenir, per a cada subgrup, un perfil mitjà d'altura i velocitat respecte a la distància de terreny recorreguda. Una vegada més, quan s'efectua la combinació amb les trajectòries en terra posteriorment, aquest perfil únic se sol assignar a la trajectòria principal i a les subtrajectòries de la mateixa manera.

Coneixent el pes de l'avió, la variació de la velocitat i l'impuls es pot calcular a través d'un procediment pas a pas basat en equacions de moviment. Abans d'això, és útil processar prèviament les dades a fi de minimitzar els efectes dels errors de radar que poden fer que els càlculs d'acceleració siguin poc fiables. El primer pas en cada cas consisteix a redefinir el perfil connectant els segments rectilinis per representar les etapes pertinents del vol, de manera que cada segment es classifiqui correctament, és a dir, com un desplaçament en terra ferma, ascens o descens a velocitat constant, reducció d'impuls o acceleració o desacceleració amb o sense canvi de la posició dels flaps. El pes de l'avió i les condicions atmosfèriques també constitueixen informació necessària.

La secció 2.7.11 posa de manifest que s'ha de considerar un mètode específic per tenir en compte la dispersió lateral de les rutes nominals o trajectòries principals. Les mostres de dades de radar es caracteritzen per dispersions similars de trajectòries de vols en el pla vertical. No obstant això, no és una pràctica habitual modelitzar la dispersió vertical com una variable independent; sorgeix principalment per les diferències entre el pes de l'avió i els procediments operatius que es tenen en compte quan es preprocessen les dades d'entrada de trànsit.

2.7.13. Construcció de segments de trajectòries de vol.

Cada trajectòria de vol s'ha de definir mitjançant un conjunt de coordenades de segments (nodes) i paràmetres de vol. L'origen es té en compte per determinar les coordenades dels segments de la trajectòria en terra. A continuació, es calcula el perfil del vol, recordant que, per a un conjunt d'etapes del procediment de vol determinat, el perfil depèn de la trajectòria en terra; per exemple, amb el mateix impuls i a la mateixa velocitat, la velocitat d'ascens en inferior, al seu torn, que la del vol en línia recta. Finalment, els segments de la trajectòria del vol tridimensional es construeixen mitjançant la combinació del perfil bidimensional del vol i la trajectòria en terra tridimensional.¹⁵

Trajectòria en terra.

Una trajectòria en terra, ja sigui una trajectòria principal o una subtrajectòria dispersa, es defineix mitjançant una sèrie de coordenades (x,y) en el pla de terra (per exemple, a partir de la informació de radar) o mitjançant una seqüència de comandaments vectorials que descriuen els segments rectes i els arcs circulars (viratges de radi definit r i canvi de rumb $\Delta\xi$).

Per a la modelització de la segmentació, un arc es representa mitjançant una seqüència de segments rectes col·locats en els subarcs. Encara que no apareixen explícitament en els segments de la trajectòria en terra, el balanceig de l'avió durant els viratges influeix en la seva definició. L'**apèndix B4** explica com calcular els angles de balanceig durant un viratge uniforme però, evidentment, no s'apliquen realment ni s'eliminen a l'instant. No es prescriu com gestionar les transicions entre els vols rectes i en viratge, o bé entre un viratge i un d'immediatament seqüencial. Per norma general, els detalls, que competeixen a l'usuari (vegeu la secció 2.7.11), poden tenir un efecte insignificant en les corbes de nivell de soroll finals; el requisit consisteix principalment a evitar les discontinuïtats en els extrems del viratge, i això es pot aconseguir simplement, per exemple, inserint segments de transició curts sobre els quals l'angle de balanceig canvia linealment amb la distància. Només en el cas especial que un viratge particular pugui tenir un efecte dominant en les corbes de nivell de soroll finals, seria necessari modelitzar les dinàmiques de la transició d'una manera més realista, a fi de relacionar l'angle de balanceig amb tipus d'avions particulars i adoptar proporcions de balanceig apropiades. En aquest context n'hi ha prou amb posar de manifest que els subarcs finals $\Delta\xi_{\text{trans}}$ en qualsevol viratge depenen dels requisits de canvi de l'angle de balanceig. La resta de l'arc amb canvi de rumb de $\Delta\xi - 2 \cdot \Delta\xi_{\text{trans}}$ graus es divideix en subarcs n_{sub} segons l'equació:

$$n_{\text{sub}} = \text{int}(1 + (\Delta\xi - 2 \cdot \Delta\xi_{\text{trans}})/30) \quad (2.7.3)$$

on $\text{int}(x)$ és una funció que torna la part entera de x. Llavors, el canvi de rumb $\Delta\xi_{\text{sub}}$ de cada subarc es calcula com

$$\Delta\xi_{\text{sub}} = (\Delta\xi - 2 \cdot \Delta\xi_{\text{trans}})/n_{\text{sub}} \quad (2.7.4)$$

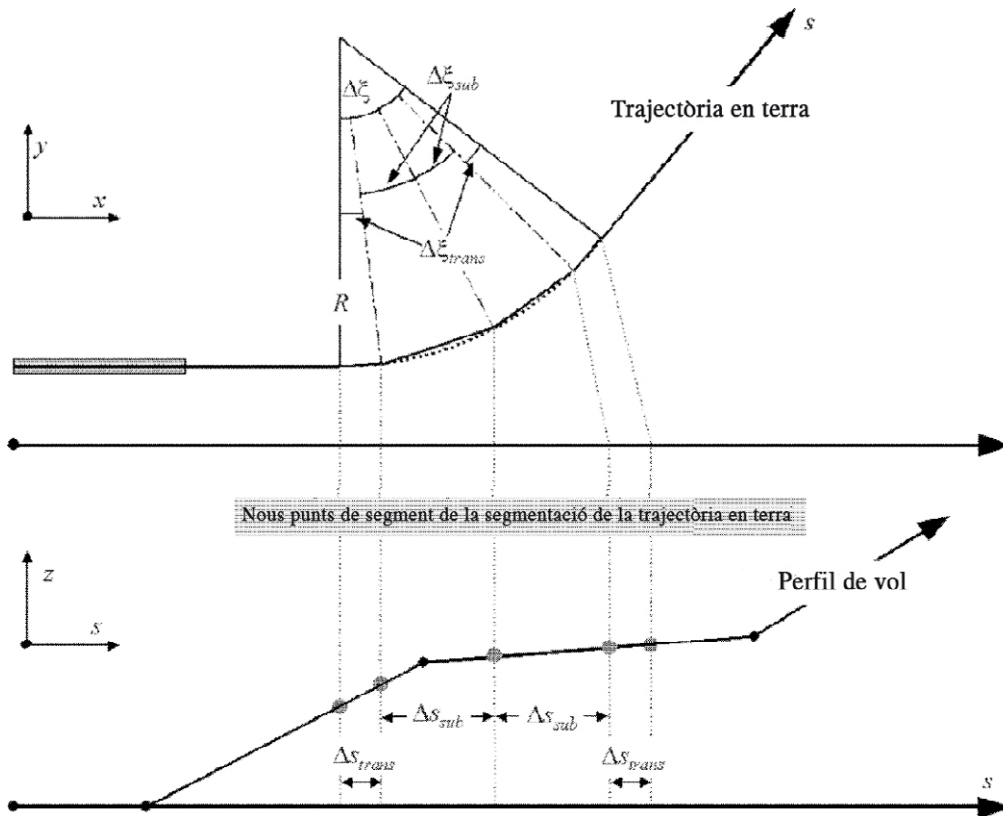
on n_{sub} necessita ser prou gran per garantir que $\Delta\xi_{\text{sub}} \leq 30$ graus. La segmentació d'un arc (excloso els subsegments de transició de terminació) s'il·lustra a la **figura 2.7.f**.¹⁶

¹⁵ A aquest efecte, la longitud total de la trajectòria en terra sempre ha d'excedir la del perfil del vol. Això es pot aconseguir, si és necessari, amb la incorporació de segments rectes de longitud adequada a l'últim segment de la trajectòria en terra.

¹⁶ Definida d'aquesta manera senzilla, la longitud total de la trajectòria segmentada és lleugerament inferior a la de la trajectòria circular. No obstant això, l'error en les corbes de nivell de soroll consegüent és insignificant si els increments angulars són inferiors a 30°.

Figura 2.7.f

Construcció dels segments de la trajectòria del vol que divideixen el viratge en segments de longitud Δs (vista superior en el pla horitzontal, vista inferior en el pla vertical)



Perfil del vol.

Els paràmetres que descriuen cada segment del perfil del vol a l'inici (sufix 1) i al final (sufix 2) del segment són:

- s_1, s_2 distància al llarg de la trajectòria en terra,
- z_1, z_2 altura de l'avió,
- V_1, V_2 velocitat respecte a terra,
- P_1, P_2 paràmetre de potència relacionat amb el soroll (d'acord amb les corbes de NPD),
- ϵ_1, ϵ_2 angle de balanceig.

Per crear un perfil de vol a partir d'un conjunt d'etapes del procediment (síntesi de la ruta del vol), els segments es creen en seqüències per aconseguir les condicions necessàries en els punts finals. Els paràmetres dels punts finals per a cada segment es converteixen en els paràmetres dels punts inicials per a cada segment següent. En el càlcul de qualsevol segment, els paràmetres es coneixen; les condicions necessàries del punt final s'especifiquen en l'etapa del procediment. Les etapes estan definides en la informació per defecte ANP, o bé els defineix l'usuari (per exemple, a partir dels manuals de vol). Les condicions finals solen ser l'altura i la velocitat; la tasca de creació de perfils consisteix a determinar la distància de la trajectòria coberta per assolir les condicions esmentades. Els paràmetres no definits es determinen mitjançant els càlculs de rendiment del vol que descriu l'apèndix B.

Si la trajectòria en terra és recta, els punts del perfil i els paràmetres del vol associats es poden determinar independentment de la trajectòria en terra (l'angle de balanceig sempre és zero). No obstant això, és estrany que les trajectòries en terra siguin rectes; solen incorporar viratges i, per aconseguir els millors resultats, s'han de comptabilitzar quan es determina el perfil de vol bidimensional, quan sigui procedent, dividint els segments del perfil en els nodes de la trajectòria en terra per introduir canvis de l'angle de balanceig. Per norma general, la longitud del segment següent es desconeix des del principi i es calcula suposant provisionalment que no es produeix cap canvi en l'angle de balanceig. Si s'observa que el segment provisional engloba un o diversos nodes de la trajectòria en terra, el primer en s , és a dir, $s_1 < s < s_2$, el segment es trunca en s , i aquí es calculen els paràmetres mitjançant interpolació (vegeu a continuació). Aquests es converteixen en els paràmetres dels punts finals del segment actual i els paràmetres dels punts inicials d'un nou segment —que conserven les mateixes condicions finals objectiu—. Si no hi ha cap node de la trajectòria en terra que hi intervingui, es confirma el segment provisional.

Si s'ignoren els efectes dels viratges en el perfil de vol, s'adopta la solució d'un únic segment en vol recte, encara que es conserva la informació de l'angle de balanceig per a un ús posterior.

Independentment que els efectes del viratge es modelitzin completament o no, cada trajectòria de vol tridimensional es genera mitjançant la combinació del seu perfil de vol bidimensional amb la seva trajectòria en terra bidimensional. El resultat és una seqüència de conjunts de coordenades (x,y,z) , i cada una d'aquestes és un node de la trajectòria en terra segmentada, un node del perfil de vol o ambdós, i els punts del perfil van acompanyats dels valors corresponents d'altura z , velocitat respecte al sòl V , angle de balanceig ε i potència del motor P . Per a un punt de la via (x,y) que hi ha entre els punts finals d'un segment del perfil del vol, els paràmetres del vol s'interpolen de la manera següent:

$$z = z_1 + f \cdot (z_2 - z_1) \quad (2.7.5)$$

$$V = \sqrt{V_1^2 + f \cdot (V_2^2 - V_1^2)} \quad (2.7.6)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + f \cdot (\varepsilon_2 - \varepsilon_1) \quad (2.7.7)$$

$$P = \sqrt{P_1^2 + f \cdot (P_2^2 - P_1^2)} \quad (2.7.8)$$

on

$$f = (s - s_1) / (s_2 - s_1) \quad (2.7.9)$$

S'ha de tenir en compte que, mentre que se suposa que z i ε varien linealment amb la distància, se suposa que V i P varien linealment amb el temps (és a dir, amb una acceleració constant¹⁷).

Quan s'associen els segments del perfil del vol amb les dades de radar (anàlisi de la trajectòria del vol), totes les distàncies dels punts finals, les altures, les velocitats i els angles de balanceig es determinen directament a partir d'aquestes dades; només el règim de potència s'ha de calcular segons les equacions de rendiment. Tenint en compte que les coordenades del perfil de vol i de la trajectòria en terra es poden associar segons correspongui, sol ser una tasca força senzilla.

Segmentació del desplaçament en terra ferma en l'enlairament.

En l'enlairament, a mesura que l'avió accelera entre el punt en què s'allibera el fre (el que també es coneix com a punt de partida de rodatge, SOR) i el punt d'enlairament, la velocitat canvia radicalment en una distància compresa entre 1.500 i 2.500 m, des de zero fins a un rang comprès entre 80 i 100 m/s.

¹⁷ Encara que el reglatge de la potència del motor es mantingui constant al llarg d'un segment, la força propulsora i l'acceleració poden canviar a causa de la variació de la densitat de l'aire amb l'altura. No obstant això, als efectes de la modelització del soroll, aquests canvis solen ser insignificants.

L'impuls en l'enlairament es divideix en segments amb longituds variables i , respecte a cadascuna d'aquestes, la velocitat de l'avió canvia en increments específics ΔV de no més de 10 m/s (al voltant de 20 kt). Encara que realment varia durant el rodatge en l'enlairament, es considera que una hipòtesi d'acceleració constant és adequada per a aquest propòsit. En aquest cas, per a la fase d'enlairament, V_1 és la velocitat inicial, V_2 és la velocitat d'enlairament, n_{TO} és el nombre de segments d'enlairament i s_{TO} és la distància d'enlairament equivalent s_{TO} . Per a la distància d'enlairament equivalent s_{TO} (vegeu l'**apèndix B**), la velocitat inicial V_1 i la velocitat d'enlairament V_2 , el nombre n_{TO} de segments per al desplaçament en terra ferma és:

$$n_{TO} = \text{int} (1 + (V_2 - V_1)/10) \quad (2.7.10)$$

i, en conseqüència, el canvi de velocitat al llarg del segment és:

$$\Delta V = (V_2 - V_1)/n_{TO} \quad (2.7.11)$$

i el temps Δt en cada segment (suposant una acceleració constant) és:

$$\Delta t = \frac{2 \cdot s_{TO}}{(V_2 + V_1) \cdot n_{TO}} \quad (2.7.12)$$

La longitud $s_{TO,k}$ del segment k ($1 \leq k \leq n_{TO}$) del rodatge en l'enlairament és:

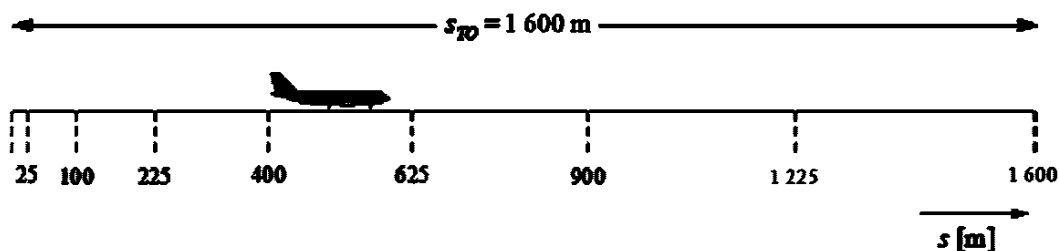
$$s_{TO,k} = (k - 0,5) \cdot \Delta V \cdot \Delta t = \frac{(2k - 1) \cdot s_{TO}}{n_{TO}^2} \quad (2.7.13)$$

Exemple:

Per a una distància d'enlairament $s_{TO} = 1.600$ m, $V_1 = 0$ m/s i $V_2 = 75$ m/s, això resulta en $n_{TO} = 8$ segments amb longituds que oscil·len entre 25 i 375 metres (vegeu la **figura 2.7.g**):

Figura 2.7.g

Segmentació del rodatge d'enlairament (exemple per a vuit segments)



Com succeeix amb els canvis de velocitat, l'impuls de l'avió canvia al llarg de cada segment mitjançant un increment constant ΔP , que es calcula com:

$$\Delta P = (P_{TO} - P_{\text{init}})/n_{TO} \quad (2.7.14)$$

on P_{TO} i P_{init} , respectivament, designen l'impuls de l'avió en el punt d'enlairament i l'impuls de l'avió al punt de partida de rodatge d'enlairament.

L'ús d'aquest increment d'impuls constant (en lloc de l'ús de l'equació de forma quadràtica 2.7.8) pretén ser coherent amb la relació lineal entre l'impuls i la velocitat en el cas d'un avió amb motor de reacció (equació B-1).

Segmentació del segment d'ascens inicial.

Durant el segment d'ascens inicial, la geometria canvia ràpidament, en particular respecte a les ubicacions de l'observador en el costat de la trajectòria del vol, on l'angle beta canvia ràpidament a mesura que l'avió ascendeix al llarg del segment inicial. Les comparacions amb càlculs de segments molt petits revelen que un únic segment d'ascens ofereix una aproximació molt pobre al càlcul del soroll en punts situats en els laterals de la trajectòria del vol. La precisió del càlcul es millora mitjançant la subsegmentació del primer segment d'enlairament. L'atenuació lateral influeix significativament en la longitud de cada segment i en el nombre. Tenint en compte l'expressió de l'atenuació lateral total de l'avió amb motors muntats en fusellatge, es pot observar que, per a un canvi limitat de l'atenuació lateral d'1,5 dB per subsegment, el segment d'ascens inicial s'ha de subsegmentar en funció del conjunt de valors d'altura següent:

$$z = \{18,9; 41,5; 68,3; 102,1; 147,5; 214,9; 334,9; 609,6; 1.289,6\} \text{ metres, o}$$

$$z = \{62, 136, 224, 335, 484, 705, 1.099, 2.000, 4.231\} \text{ peus}$$

Les altures anteriors s'apliquen identificant quina altura de les anteriors és més a prop del punt final del segment original. Les altures reals del subsegment es calcularien de la manera següent:

$$z'_i = z [z_i/z_N] \quad (i = 1 \dots N) \quad (2.7.15)$$

on z és l'altura de l'extrem del segment original, z_i és l'altura i del conjunt de valors d'altures i z_N és el límit superior més proper a l'altura z . Aquest procés fa que el canvi d'atenuació lateral al llarg de cada segment sigui constant, i s'obtenen les corbes de nivell de soroll més precises, però sense el cost que suposa utilitzar segments molt curts.

Exemple:

Si l'altura del punt final del segment original està en $z = 304,8$ m, llavors d'acord amb el conjunt de valors d'altura, $214,9 < 304,8 < 334,9$ i el límit superior més proper a $z = 304,8$ m, és $z_7 = 334,9$ m. Per tant, les altures dels punts finals del subsegment es calculen de la manera següent:

$$z'_i = 304,8 [z_i/334,9] \quad (i = 1..N)$$

Per tant, z'_1 seria 17,2 m i z'_2 seria 37,8 m, etc.

Els valors de velocitat i potència del motor en els punts inserits s'interpolen utilitzant les equacions (2.7.11) i (2.7.13), respectivament.

Segmentació dels segments en vol.

Després d'obtenir la trajectòria del vol segmentat segons el procediment que descriu la secció 2.7.13 i d'aplicar la subsegmentació descrita, pot ser necessari fer ajustos addicionals de segmentació. Aquests ajustos inclouen:

- l'eliminació dels punts de la trajectòria del vol que estan molt propers entre si;
- la inserció de punts addicionals si la velocitat canvia al llarg dels segments que són massa llargs.

Quan dos punts adjacents són a menys de 10 metres, i si les velocitats i els impulsos associats són els mateixos, és necessari eliminar un dels punts.

Per als segments en vol en què hi ha un canvi de velocitat important al llarg d'un segment, s'ha de subdividir com en el desplaçament en terra ferma, és a dir

$$n_{seg} = \text{int}(1 + |V_2 - V_1|/10) \quad (2.7.16)$$

on V_1 i V_2 són les velocitats inicials i finals del segment, respectivament. Els paràmetres del subsegment corresponent es calculen de manera similar al desplaçament en terra ferma en l'enlairament, utilitzant les equacions de 2.7.11 a 2.7.13.

Rodatge en terra en els aterratges.

Encara que el rodatge en terra per a l'aterratge és bàsicament una inversió del rodatge en terra per a l'enlairament, és necessari tenir en compte especialment:

— l'impuls invers, que de vegades s'aplica per desaccelerar l'avió;

— els avions que deixen la pista després de la desacceleració (l'avió que deixa la pista deixa de contribuir al soroll de l'aire, ja que s'ignora el soroll de «taxiing»).

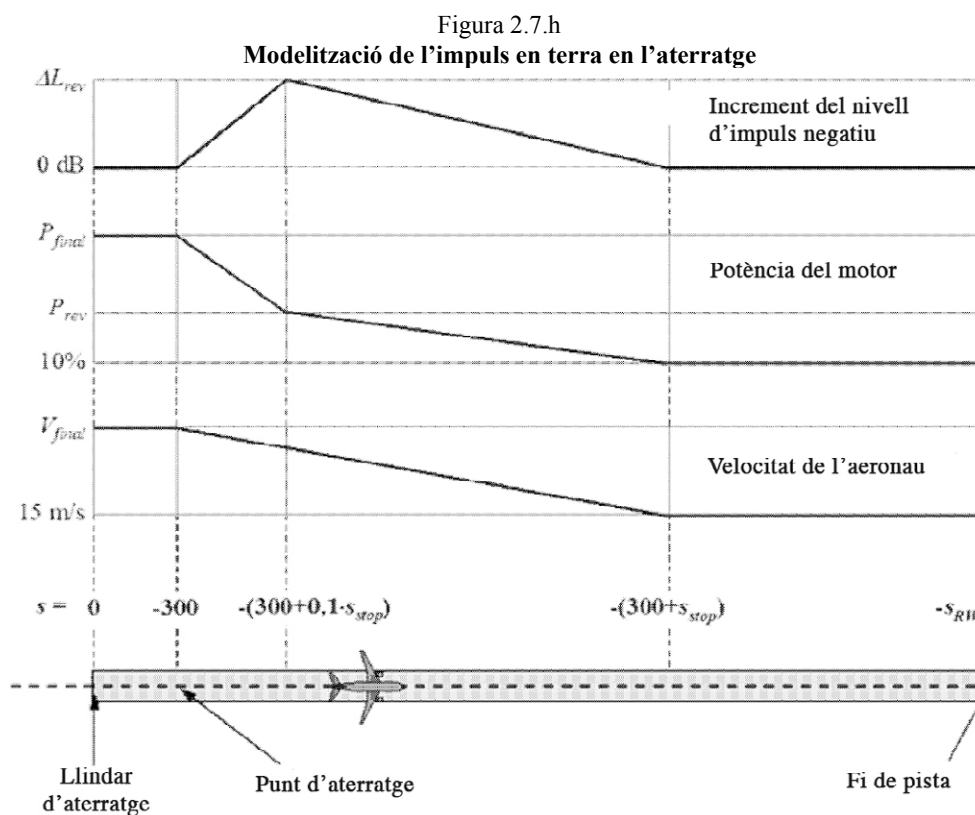
En comparació amb la distància de rodatge d'enlairament, que s'obté a partir dels paràmetres del rendiment de l'avió, la distància de parada s_{stop} (és a dir, la distància des de l'aterratge fins al punt en què l'avió surt de la pista) no és purament específica de l'avió. Encara que es pot calcular una distància de parada mínima a partir del rendiment i la massa de l'avió (i l'impuls invers disponible), la distància de parada real també depèn de la ubicació de les pistes de rodatge, de la situació del trànsit i dels reglaments específics de l'aeroport que regeixen l'ús de l'impuls invers.

L'ús de l'impuls invers no és un procediment estàndard; només s'aplica si no es pot aconseguir la desacceleració necessària mitjançant la utilització dels frens de les rodes. (L'impuls invers pot ser realment molest, ja que un canvi ràpid de la potència del motor del ralenti a l'ajust invers produeix un estrèpit de soroll).

No obstant això, la majoria de les pistes s'utilitzen per als enlairaments i els aterratges, ja que l'impuls invers té un efecte mínim en els contorns de soroll, tenint en compte que l'energia sonora total en les proximitats de la pista està dominada pel soroll produït per les operacions d'enlairament. Les contribucions de l'impuls invers a les corbes de nivell de soroll només poden ser significatives quan l'ús de la pista està limitat a les operacions d'aterratge.

Físicament, el soroll de l'impuls invers és un procés molt complex, però, a causa del fet que té una importància relativament baixa per al càlcul de les isòfones, es pot modelitzar de manera senzilla —el canvi ràpid de la potència del motor es té en compte mitjançant una segmentació adequada—.

És evident que la modelització de l'impuls en terra en l'aterratge és menys complicada que per al soroll de l'impuls en l'enlairament. Es recomanen els supòsits següents de modelització simplificada per a ús general, sempre que no hi hagi informació detallada disponible (vegeu la **figura 2.7.h**).



L'avió aterra 300 metres més enllà del llindar d'aterratge (que té la coordenada $s = 0$ al llarg de la trajectòria en terra d'aproximació). A continuació, l'avió es desaccelera al llarg de la distància de parada s_{stop} —los valors específics de l'avió es faciliten a la base de dades ANP— a partir de la velocitat d'aproximació final V_{final} fins a 15 m/s. Tenint en compte els canvis ràpids de velocitat al llarg d'aquest segment, s'ha de subsegmentar de la mateixa manera que per al desplaçament en terra ferma en l'enlairament (segments en vol amb canvis ràpids de velocitat), utilitzant les equacions de 2.7.10 a 2.7.13.

La potència del motor canvia d'una potència d'aproximació final en l'aterratge a un reglatge de la potència d'impuls invers P_{rev} al llarg d'una distància de $0,1 \times s_{stop}$, a continuació disminueix al 10% de la potència màxima disponible al llarg del 90% restant de la distància de parada. Fins al final de la pista (a $s = -s_{RWY}$), la velocitat de l'avió roman constant.

Les corbes NPD per a l'impuls invers actualment no estan incloses a la base de dades d'ANP i, per tant, és necessari utilitzar en les corbes convencionals per modelitzar aquest efecte. Normalment, la potència d'impuls invers P_{rev} ronda el 20% del reglatge de la potència total, i es recomana utilitzar aquest valor quan no hi ha disponible informació operativa. No obstant això, amb un reglatge de la potència determinat, l'impuls invers tendeix a generar molt més soroll que l'impuls de propulsió, i és necessari aplicar un increment ΔL al nivell de l'esdeveniment de les taules NPD, de manera que augmenti des de zero fins a un valor ΔL_{rev} (es recomana provisionalment un valor de 5 dB¹⁸) al llarg de $0,1 \times s_{stop}$, a continuació, disminueix linealment fins a zero durant la resta de la distància de parada.

2.7.14. Càlcul de soroll d'un únic esdeveniment.

El nucli del procés de modelització, descrit aquí íntegrament, és el càlcul del nivell de l'esdeveniment de soroll a partir de la informació de la trajectòria del vol descrita a les seccions 2.7.7 a 2.7.13.

¹⁸ Això es va recomanar en l'edició anterior de CEAC, Doc 29, però encara es considera provisional, pendent de l'adquisició de més dades experimentals corroboratives.

2.7.15. Índexs d'un únic esdeveniment.

El so generat pel moviment d'un avió en la ubicació de l'observador s'expressa com un «nivell sonor (soroll) d'un esdeveniment únic», que és un indicador del seu impacte sobre les persones. El so rebut es mesura en termes de soroll mitjançant una escala de decibels bàsica $L_{(t)}$ que aplica una ponderació de freqüències (o filtre) per simular les característiques de l'oïda humana. L'escala més important utilitzada en la modelització de les corbes de nivell de soroll de les aeronaus és el nivell acústic ponderat A, L_A .

La mètrica que s'utilitza amb més freqüència per descriure esdeveniments complets és «el nivell sonor d'exposició sonora d'un esdeveniment únic», L_E , que té en compte tota l'energia sonora dels esdeveniments (o la major part d'aquesta energia). L'elaboració de disposicions per a la integració temporal necessària per a la seva obtenció implica un augment de les complexitats principals de la modelització de la segmentació (o simulació). Més senzill de modelitzar és l'altre índex alternatiu L_{max} , que és el nivell màxim instantani que es produeix durant l'esdeveniment; no obstant això, L_E és el component bàsic dels índexs moderns de soroll d'aeronaus, i en el futur es poden esperar models pràctics que englobin ambdós índexs L_{max} i L_E . Qualsevol índex es pot mesurar amb diferents escales de soroll; en aquest document, només es considera el nivell sonor amb ponderació A. Simbòlicament, l'escala s'indica generalment mitjançant el subíndex A, és a dir, L_{AE} , L_{Amax} .

El nivell d'exposició sonora (de soroll) d'un únic esdeveniment s'expressa exactament com:

$$L_E = 10 \cdot \lg \left(\frac{1}{t_0} \int_{t_1}^{t_2} 10^{L_{(t)}/10} dt \right) \quad (2.7.17)$$

on t_0 denota un temps de referència. Es tria l'interval d'integració $[t_1, t_2]$ per garantir que s'engloba (gairebé) tot el so pertinent de l'esdeveniment. Molt sovint, es trien els límits t_1 i t_2 per englobar el període per al qual el nivell de $L_{(t)}$ es troba dins de $L_{max} - 10$ dB. Aquest període es coneix com el temps «10 dB per sota del màxim». Els nivells d'exposició sonora tabulats a la base de dades ANP són valors 10 dB per sota del màxim.¹⁹

Per a la modelització de les corbes de nivell de soroll d'una aeronau, l'aplicació principal de l'equació 2.7.17 utilitzada és l'índex normalitzat nivell d'exposició al soroll L_{AE} (acrònim SEL):

$$L_{AE} = 10 \cdot \lg \left(\frac{1}{t_0} \int_{t_1}^{t_2} 10^{L_A(t)/10} dt \right) \quad \text{on} \quad t_0 = 1 \text{ segon} \quad (2.7.18)$$

Les equacions del nivell d'exposició anteriors es poden utilitzar per determinar els nivells de l'esdeveniment quan es coneix tota la història temporal $L_{(t)}$. Aquests historials de temps no es defineixen en la metodologia de modelització de soroll recomanada; els nivells d'exposició dels esdeveniments es calculen sumant els valors dels segments; els nivells de soroll dels esdeveniments parcials, corresponents a cadascun d'ells, defineixen la contribució d'un únic segment finit de la trajectòria del vol.

2.7.16. Determinació dels nivells de l'esdeveniment a partir de les dades NPD.

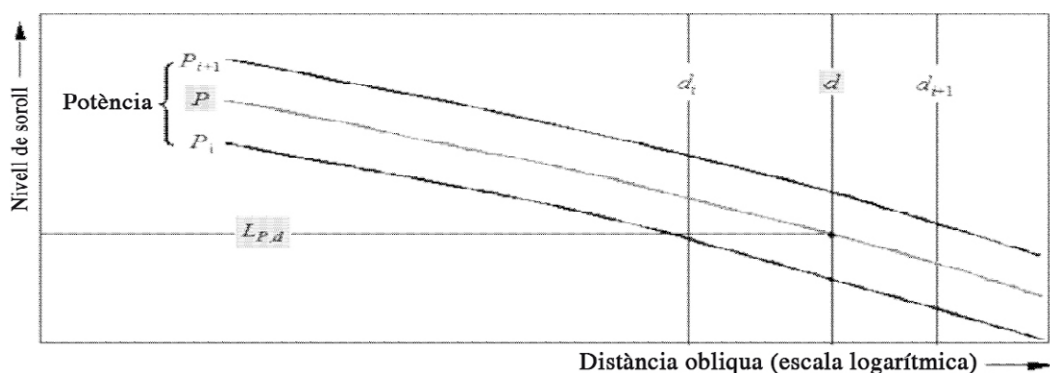
La font principal de dades sobre el soroll dels avions és la base de dades internacional de rendiment i soroll de les aeronaus (ANP). En aquesta hi figuren els valors de L_{max} i L_E en funció de la distància de propagació d per a tipus d'avions específics, variants,

¹⁹ L_E 10 dB per sota del màxim pot ser 0,5 dB més baix que el valor de L_E avaluat durant més temps. No obstant això, excepte en distàncies obliqües curtes on els nivells de l'esdeveniment són alts, sovint hi ha sorolls ambientals estranys que fan que els intervals de mesura més llargs siguin poc pràctics, i els valors 10 dB per sota del màxim són la norma. Com que els estudis dels efectes del soroll (utilitzats per «calibrar» els contorns de soroll) també tendeixen a basar-se en valors 10 dB per sota del màxim, les tabulacions ANP es consideren totalment convenients.

configuracions del vol (aproximació, sortida, flaps) i reglatge de la potència P . Estan relacionats amb un vol uniforme a velocitats de referència específiques V_{ref} al llarg d'una trajectòria de vol recta suposadament infinita.²⁰

Més endavant es descriu la manera com s'especifiquen les variables independents P i d . En una única cerca, amb els valors d'entrada P i d , els valors de sortida necessaris són els nivells bàsics $L_{max}(P,d)$ o $L_{E\infty}(P,d)$ (aplicables a una trajectòria de vol infinita). Llevat que els valors resultin estar tabulats exactament per a P o d , per norma general cal calcular els nivells necessaris de soroll de l'esdeveniment mitjançant la interpolació. S'utilitza una interpolació lineal entre el reglatge de la potència tabulada, mentre que s'utilitza una interpolació logarítmica entre les distàncies tabulades (vegeu la **figura 2.7.i**).

Figura 2.7.i
Interpolació en les corbes soroll-potència-distància



Si P_i i P_{i+1} són valors de potència del motor per als quals es tabula el nivell de soroll respecte a les dades de distància, el nivell de soroll $L(P)$ a una distància determinada per a la potència intermèdia P , entre P_i i P_{i+1} , resulta de:

$$L(P) = L(P_i) + \frac{L(P_{i+1}) - L(P_i)}{P_{i+1} - P_i} \cdot (P - P_i) \quad (2.7.19)$$

Si, amb qualsevol reglatge de la potència, d_i i d_{i+1} són distàncies per a les quals es tabulen les dades de soroll, el nivell de soroll $L(d)$ per a una distància intermèdia d , entre d_i i d_{i+1} resulta de:

$$L(d) = L(d_i) + \frac{L(d_{i+1}) - L(d_i)}{\lg d_{i+1} - \lg d_i} \cdot (\lg d - \lg d_i) \quad (2.7.20)$$

Amb les equacions (2.7.19) i (2.7.20), es pot obtenir un nivell de soroll $L(P,d)$ per a qualsevol reglatge de la potència P i a qualsevol distància d prevista a la base de dades NPD.

Per a distàncies d que quedin fora del marc de NPD, s'utilitza l'equació 2.7.20 per efectuar l'extrapolació dels últims dos valors, és a dir, arribades des de $L(d_1)$ i $L(d_2)$ o sortides des de $L(d_{i-1})$ i $L(d_i)$, on I és el nombre total de punts NPD en la corba. Per tant,

Arribades:
$$L(d) = L(d_2) + \frac{L(d_1) - L(d_2)}{\lg d_2 - \lg d_1} \cdot (\lg d_2 - \lg d) \quad (2.7.21)$$

Sortides:
$$L(d) = L(d_{i-1}) - \frac{L(d_{i-1}) - L(d_i)}{\lg d_i - \lg d_{i-1}} \cdot (\lg d - \lg d_{i-1}) \quad (2.7.22)$$

²⁰ Encara que la noció d'una trajectòria de vol de longitud infinita és important per definir el nivell d'exposició al soroll de l'esdeveniment L_E , té menys rellevància en el cas del nivell màxim de l'esdeveniment L_{max} , que es regeix segons el soroll emès per l'avió en una posició particular en el punt més proper a (o a prop de) l'observador. Als efectes de modelització, el paràmetre de distància NPD es considera com la distància mínima entre l'observador i el segment.

Tenint en compte que, a curtes distàncies d , els nivells de soroll augmenten amb molta rapidesa a mesura que disminueix la distància de propagació, es recomana imposar un límit inferior de 30 m per a d , és a dir, $d = \max(d, 30 \text{ m})$.

Ajust d'impedància de dades NPD estàndard.

Les dades NPD facilitades a la base de dades d'ANP es normalitzen per a condicions atmosfèriques específiques (temperatura de 25 °C i pressió de 101,325 kPa). Abans d'aplicar el mètode d'interpolació/extrapolació descrit anteriorment, s'ha d'aplicar un ajust d'impedància acústica a aquestes dades NPD estàndard.

La impedància acústica està relacionada amb la propagació de les ones sonores en un mitjà, i es defineix com el producte de la densitat de l'aire i la velocitat del so. Per a una intensitat sonora determinada (energia per unitat de superfície) percebuda a una distància específica de la font, la pressió sonora associada (utilitzada per definir els índexs SEL i L_{Amax}) depèn de la impedància acústica de l'aire en la ubicació de mesura. És una funció de la temperatura i la pressió atmosfèrica (i de l'altitud indirectament). Per tant, és necessari ajustar les dades NPD estàndard de la base de dades ANP per tenir en compte les condicions reals de temperatura i pressió en el punt del receptor, que difereixen significativament de les condicions normalitzades de les dades ANP.

L'ajust d'impedància que s'ha d'aplicar als nivells estàndard NPD s'expressa de la manera següent:

$$\Delta_{\text{Impedance}} = 10 \cdot \lg\left(\frac{\rho \cdot c}{409,81}\right) \quad (2.7.23)$$

on:

| | |
|-----------------------------|---|
| $\Delta_{\text{Impedance}}$ | Ajust d'impedància per a les condicions atmosfèriques reals en el punt del receptor (dB) |
| $\rho \cdot c$ | Impedància acústica (newton-segons/m ³) de l'aire en el punt del receptor (409,81 és la impedància associada amb les condicions atmosfèriques de referència de les dades NPD a la base de dades ANP). |

La impedància $\rho \cdot c$ es calcula de la manera següent:

$$\rho \cdot c = 416,86 \cdot \left[\frac{\delta}{\theta^{1/2}} \right] \quad (2.7.24)$$

| | |
|----------|---|
| Δ | p/p_0 , el quocient entre la pressió de l'aire ambient a l'altitud de l'observador i la pressió de l'aire estàndard al nivell mitjà del mar: $p_0 = 101,325 \text{ kPa}$ (o $1.013,25 \text{ mb}$) |
| θ | $(T + 273,15)/(T_0 + 273,15)$, el quocient entre la temperatura de l'aire a l'altitud de l'observador i la temperatura de l'aire estàndard al nivell mitjà del mar: $T_0 = 15,0 \text{ °C}$ |

L'ajust d'impedància acústica sol ser inferior a algunes dècimes de dB. En particular, cal destacar que, en condicions atmosfèriques estàndard ($p_0 = 101,325 \text{ kPa}$ i $T_0 = 15,0 \text{ °C}$), l'ajust d'impedància és inferior a 0,1 dB (0,074 dB). No obstant això, quan hi ha una variació important de temperatura i de pressió atmosfèrica en relació amb les condicions atmosfèriques de referència de les dades NPD, l'ajust pot ser més important.

2.7.17. Expressions generals.

Nivell de l'esdeveniment del segment, L_{seg} .

Els valors per a un segment es determinen mitjançant l'aplicació d'ajustos als valors bàsics (trajectòria infinita) que s'obtenen en les dades NPD. El nivell de soroll màxim d'un segment de la trajectòria d'un vol $L_{max,seg}$ es pot expressar en general com:

$$L_{max,seg} = L_{max}(P, d) + \Delta_I(\varphi) - \Lambda(\beta, \ell) \quad (2.7.25)$$

i la contribució d'un segment de la trajectòria d'un vol a L_E , com:

$$L_{E,seg} = L_{E\infty}(P, d) + \Delta_V + \Delta_I(\varphi) - \Lambda(\beta, \ell) + \Delta_F \quad (2.7.26)$$

Els «termes de correcció» de les equacions 2.7.25 i 2.7.26 —que es descriuen detalladament a la secció 2.7.19— tenen en compte els efectes següents:

- Δ_V Correcció de la durada: les dades NPD corresponen a una velocitat del vol de referència. Aquesta correcció ajusta els nivells d'exposició a velocitats que no són la de referència. (No s'aplica a $L_{max,seg}$.)
- $\Delta_I(\varphi)$ Efecte de la instal·lació: descriu una variació de la directivitat lateral a causa del blindatge, la refracció i la reflexió causats pel fusellatge, i els camps de flux dels motors i el seu entorn.
- $\Lambda(\beta, \ell)$ Atenuació lateral: es tracta d'un element important en la propagació del so a angles baixos respecte a la superfície del terreny; té en compte la interacció entre les ones sonores directes i reflectides (efecte de sòl) i per als efectes de la falta d'uniformitat atmosfèrica (causada principalment pel terreny) que refracten les ones sonores a mesura que viatgen cap a l'observador pels costats de la trajectòria del vol.
- Δ_F Correcció de segments finits (fracció de soroll): té en compte la longitud finita del segment, que òbviament contribueix menys a l'exposició al soroll que una d'infinita. Només s'aplica als índexs d'exposició.

Si el segment forma part del desplaçament en terra ferma en l'enlairament o l'aterratge i l'observador es troba darrere del segment objecte d'estudi, s'apliquen càlculs especials per representar la direccionalitat pronunciada del soroll del motor de reacció que s'observa sota d'un avió a punt d'enlairar-se. Aquests càlculs especials es concreten, en particular, en l'ús d'una expressió particular del càlcul del soroll per a l'exposició al soroll:

$$L_{max,seg} = L_{max}(P, d) + \Delta_I(\varphi) - \Lambda(\beta, \ell) + \Delta_{SOR} \quad (2.7.27)$$

$$L_{E,seg} = L_{E\infty}(P, d) + \Delta_V + \Delta_I(\varphi) - \Lambda(\beta, \ell) + \Delta'_F + \Delta_{SOR} \quad (2.7.28)$$

- Δ'_F Expressió particular de la correcció del segment
- Δ_{SOR} Correcció de la directivitat: representa la direccionalitat pronunciada del soroll del motor de reacció darrere del segment del desplaçament en terra ferma

El tractament específic dels segments de desplaçament en terra ferma es descriu a la secció 2.7.19. Les seccions següents descriuen el càlcul dels nivells de soroll del segment.

Nivell de soroll d'un esdeveniment L del moviment d'un avió.

El nivell màxim L_{\max} senzillament és el valor màxim dels valors del segment $L_{\max, \text{seg}}$ (vegeu les equacions 2.7.25 i 2.7.27).

$$L_{\max} = \max (L_{\max, \text{seg}}) \quad (2.7.29)$$

on el valor de cada segment es determina a partir de les dades NPD per a la potència P i la distància d. Aquests paràmetres i els termes modificadors $\Delta_1(\varphi)$ i $\Lambda(\beta, \ell)$ s'expliquen a continuació.

El nivell d'exposició L_E es calcula com la suma de decibels de les contribucions $L_{E, \text{seg}}$ de cada segment significatiu des del punt de vista del soroll de la seva trajectòria de vol; és a dir,

$$L_E = 10 \cdot \lg \left(\sum 10^{L_{E, \text{seg}}/10} \right) \quad (2.7.30)$$

La suma s'efectua pas a pas per a cadascun dels segments de la trajectòria del vol.

La resta d'aquest capítol es dedica a la determinació dels nivells de soroll dels segments $L_{\max, \text{seg}}$ i $L_{E, \text{seg}}$.

2.7.18. Paràmetres dels segments de les trajectòries de vol.

La potència P, i la distància d, per a les quals s'interpolen els nivells bàsics $L_{\max, \text{seg}}(P, d)$ i $L_{E, \text{seg}}(P, d)$ a partir de taules NPD, es determinen a partir dels paràmetres geomètrics i operatius que defineixen el segment. La forma de fer-ho s'explica a continuació amb l'ajuda d'il·lustracions referides al pla, que conté el segment i l'observador.

Paràmetres geomètrics.

Les **figures 2.7.j a 2.7.l** mostren les geometries font-receptor quan l'observador **O** és a) darrere, b) al costat i (c) davant del segment **S₁S₂**, on la direcció del vol va de **S₁** a **S₂**. En aquests diagrames

| | |
|---------------------------------|--|
| O | és la ubicació de l'observador |
| S ₁ i S ₂ | representen l'inici i el final del segment |
| S _p | és el punt situat en el segment o en la seva extensió, on es produeix el tall amb la perpendicular traçada des de l'observador |
| d ₁ i d ₂ | són les distàncies entre l'inici del segment i la fi del segment i l'observador |
| d _s | és la distància més curta entre l'observador i el segment |
| d _p | és la distància perpendicular entre l'observador i el segment ampliat (distància obliqua mínima) |
| λ | és la longitud del segment de la trajectòria del vol |
| q | és la distància des de S ₁ a S _p (negativa si la posició de l'observador és darrere del segment) |

Figura 2.7.j

Geometria del segment de la trajectòria del vol per a l'observador darrere del segment

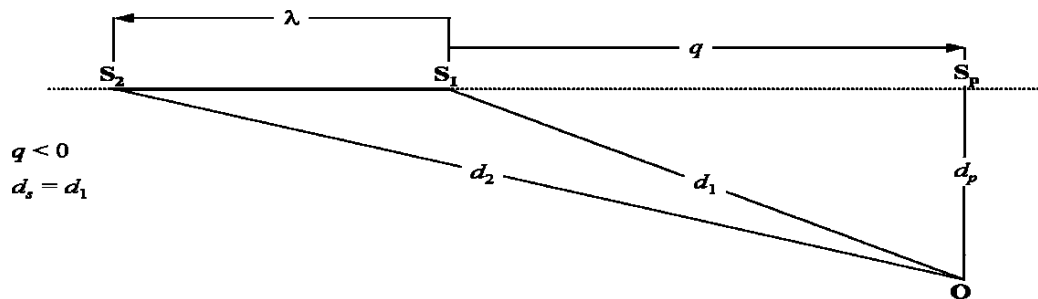


Figura 2.7.k

Geometria del segment de la trajectòria del vol per a l'observador al llarg del segment

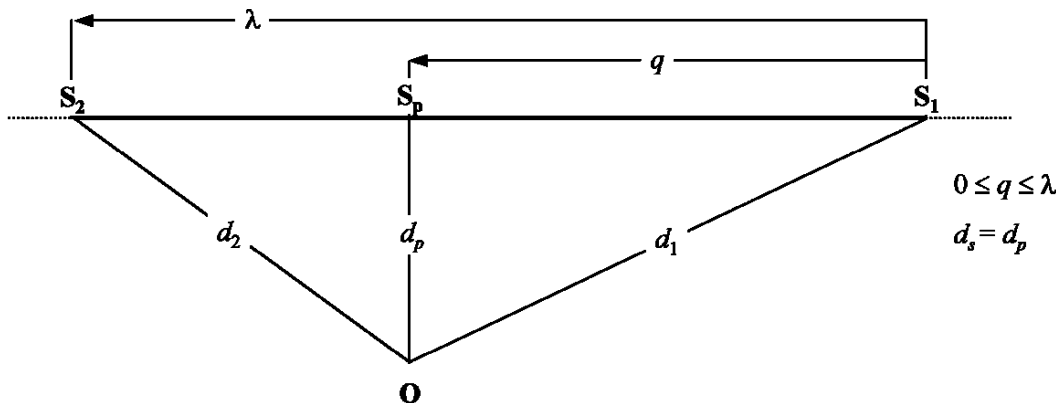
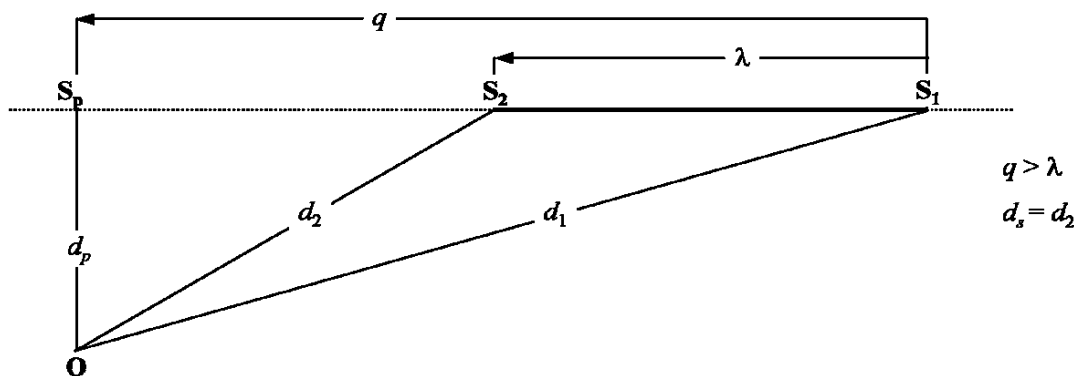


Figura 2.7.l

Geometria del segment de la trajectòria del vol per a l'observador davant del segment



El segment de la trajectòria del vol es representa mitjançant una línia contínua en negra. La línia discontinua representa l'extensió de la trajectòria del vol que s'estén fins a l'infinit en les dues direccions. Per als segments en vol, quan l'índex de l'esdeveniment és un nivell d'exposició L_E , el paràmetre de la distància NPD d és la distància d_p entre S_p i l'observador, denominada distància obliqua mínima (és a dir, la distància perpendicular des de l'observador fins al segment o la seva extensió, en altres paraules, fins a la trajectòria de vol infinita —hipotètica— de la qual es considera que el segment forma part).

No obstant això, en el cas d'índexs del nivell d'exposició on les ubicacions de l'observador són darrere dels segments terreny durant el rodatge de l'enlairament i les ubicacions davant dels segments terreny durant el rodatge de l'aterratge, el paràmetre de la distància NPD d es converteix en la distància d_s , la distància més curta des de l'observador al segment (és a dir, el mateix que per als índexs de nivell màxim).

Per als índexs de nivell màxim, el paràmetre de la distància NPD d és d_s , la distància més curta des de l'observador fins al segment.

Potència del segment P.

Les dades NPD tabulades descriuen el soroll d'un avió en un vol recte uniforme sobre una trajectòria de vol infinita, és a dir, amb una potència constant del motor P. La metodologia recomanada divideix les trajectòries de vol, al llarg de les quals la velocitat i la direcció varien, en una sèrie de segments finits, cadascun dels quals es consideren parts d'una trajectòria de vol infinita uniforme per a la qual les dades NPD són vàlides. No obstant això, la metodologia preveu canvis de potència al llarg de la longitud del segment; es considera que canvia linealment amb la distància des de P_1 a l'inici fins a P_2 al final. Per tant, és necessari definir un valor de segment uniforme equivalent P. Es considera com el valor en el punt del segment més proper a l'observador. Si l'observador és a un costat del segment (figura 2.7.k), s'obté mitjançant la interpolació, com a resultat de l'equació 2.7.8, entre els valors finals, és a dir

$$P = \sqrt{P_1^2 + \frac{q}{\lambda} \cdot (P_2^2 - P_1^2)} \quad (2.7.31)$$

Si l'observador és darrere o davant del segment, es troba en el punt final més proper, P_1 o P_2 .

2.7.19. Termes de correcció del nivell de l'esdeveniment del segment.

Les dades NPD defineixen els nivells de soroll de l'esdeveniment com una funció de la distància en perpendicular a una trajectòria de nivell recte idealitzada de longitud infinita, per la qual un avió vola amb una potència constant i a una velocitat de referència fixa.²¹ Per tant, el nivell de l'esdeveniment obtingut per interpolació dels valors tabulats en el quadre NPD per a un reglatge de la potència específic i la distància obliqua mínima es considera com un nivell bàsic. S'aplica a una trajectòria de vol infinita i s'ha de corregir per tenir en compte els efectes de 1) una velocitat que no és de referència, 2) els efectes d'instal·lació del motor (directivitat lateral), 3) l'atenuació lateral, 4) la longitud de segment finita i 5) la directivitat longitudinal darrere del punt d'inici del rodatge en l'enlairament (vegeu les equacions 2.7.25 i 2.7.26).

Correcció de la durada ΔV (només per als nivells d'exposició L_E).

Aquesta correcció²² té en compte un canvi dels nivells d'exposició si la velocitat real respecte a terra del segment difereix de la velocitat de referència de l'avió V_{ref} a la qual es refereixen les dades NPD. De la mateixa manera que la potència del motor, la velocitat varia al llarg del segment (la velocitat respecte a terra varia de V_1 a V_2) i és necessari definir una velocitat de segment equivalent V_{seg} , recordant que el segment està inclinat cap al sòl; és a dir:

$$V_{seg} = V / \cos \gamma \quad (2.7.32)$$

²¹ Les especificacions de NPD requereixen que les dades es basin en les mesures del vol recte uniforme, no necessàriament a nivell; per crear les condicions de vol necessàries, la trajectòria del vol de l'avió de prova es pot inclinar fins a l'horitzontal. No obstant això, com bé s'observarà, les trajectòries inclinades plantegen dificultats de càlcul i, quan s'utilitzen les dades per a la modelització, és convenient visualitzar les trajectòries font com rectes i a nivell.

²² Això es coneix com la correcció de la durada, perquè preveu els efectes de la velocitat de l'avió en la durada de l'esdeveniment acústic —amb la senzilla suposició que, si altres aspectes són iguals, la durada i , per tant, l'energia sonora de l'esdeveniment rebuda, és inversament proporcional a la velocitat de la font—.

on V és una velocitat del segment equivalent respecte a terra (per obtenir informació, vegeu l'equació B-22, que expressa V en termes de velocitat calibrada en l'aire, V_c i

$$\gamma = \tan^{-1} \left(\frac{z_2 - z_1}{s_2 - s_1} \right) \quad (2.7.33)$$

$$V = \sqrt{V_1^2 + \frac{q}{\lambda} \cdot (V_2^2 - V_1^2)} \quad (2.7.34)$$

Per als segments aeris, V es considera la velocitat respecte a terra en el punt d'aproximació més pròxim S , interpolada entre els valors de punt final del segment, suposant que varia linealment amb el temps; és a dir, si l'observador és a un costat del segment:

Si l'observador és darrere o davant del segment, es troba en el punt final més proper, V_1 o V_2 .

Per a segments de la pista (trams del desplaçament en terra ferma per enlairament o aterratge per als quals $\gamma = 0$), V_{seg} es considera senzillament com la mitjana de les velocitats inicials i finals del segment; és a dir:

$$V_{\text{seg}} = (V_1 + V_2)/2 \quad (2.7.35)$$

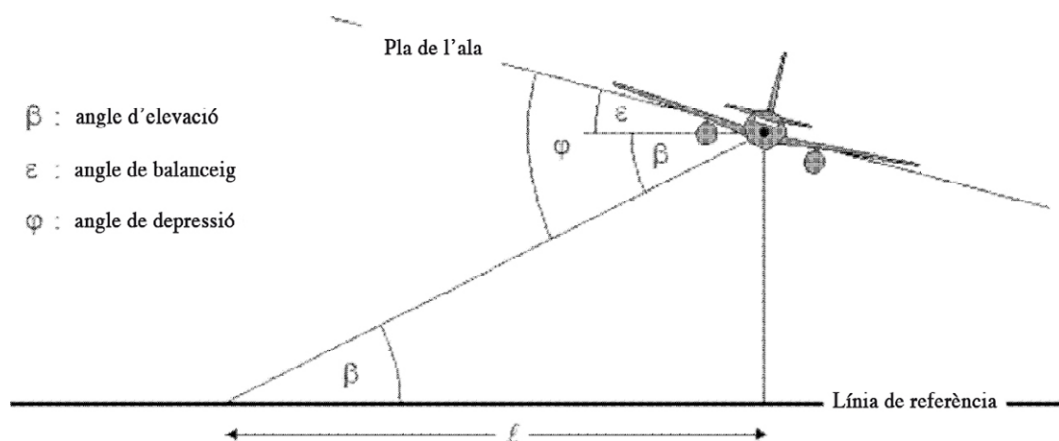
En qualsevol cas, la correcció de la durada addicional és:

$$\Delta_V = 10 \cdot \lg(V_{\text{ref}}/V_{\text{seg}}) \quad (2.7.36)$$

Geometria de la propagació sonora.

La **figura 2.7.1** il·lustra la geometria bàsica en el pla normal de la trajectòria del vol de l'avió. La línia de terra és la intersecció del pla normal i del pla de terra anivellat. (Si la trajectòria del vol és a nivell, la línia a terra és una vista final del pla de massa). L'avió experimenta moviments de balanceig en l'angle ε mesurat en sentit contrari a les agulles del rellotge sobre el seu eix longitudinal (és a dir, ascens de la semiala d'estribord). Per tant, l'angle és positiu per als viratges cap a l'esquerra i negatiu per als viratges cap a la dreta.

Figura 2.7.m
Angles de l'observador de l'avió en el pla normal a la trajectòria del vol



— L'angle d'elevació β (entre 0 i 90°) entre la trajectòria de la propagació sonora directa i la línia de terra anivellada²³ determina, juntament amb la inclinació de la trajectòria del vol i el desplaçament lateral ℓ de l'observador a partir de la trajectòria en terra, l'atenuació lateral.

— L'angle de depressió φ entre el pla de l'ala i la trajectòria de propagació determina els efectes de la instal·lació del motor. Respecte a la convenció de l'angle de balanceig $\varphi = \beta \pm \varepsilon$ amb el signe positiu per als observadors a estribord (dreta) i negatiu per als observadors a babord (esquerra).

Correcció de la instal·lació del motor Δ_I .

Un avió en vol és una font sonora complexa. No tan sols les fonts del motor (i el fusellatge) són complexes en l'origen, sinó també la configuració del fusellatge, en particular la ubicació dels motors, les influències dels patrons de radiació sonora a través de processos de reflexió, refracció i difusió mitjançant superfícies sòlides i camps de flux aerodinàmic. Això té com a conseqüència una direccionalitat no uniforme del so irradiat lateralment sobre l'eix de balanceig de l'avió, que en aquest context es denomina directivitat lateral.

Hi ha diferències importants en la directivitat lateral entre l'avió amb motors muntats al fusellatge i a la part inferior de les ales, i es preveuen en l'expressió següent:

$$\Delta_I(\varphi) = 10 \cdot \lg \left[\frac{(a \cdot \cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi)^b}{(c \cdot \sin^2 2\varphi + \cos^2 2\varphi)} \right] \quad \text{dB} \quad (2.7.37)$$

on $\Delta_I(\varphi)$ és la correcció, en dB, per a l'angle de depressió φ (vegeu la **figura 2.7.m**) i

$$a = 0,00384, \quad b = 0,0621, \quad c = 0,8786 \quad \text{per a motors muntats a les ales;}$$

$$a = 0,1225, \quad b = 0,3290, \quad c = 1 \quad \text{per a motors muntats al fusellatge.}$$

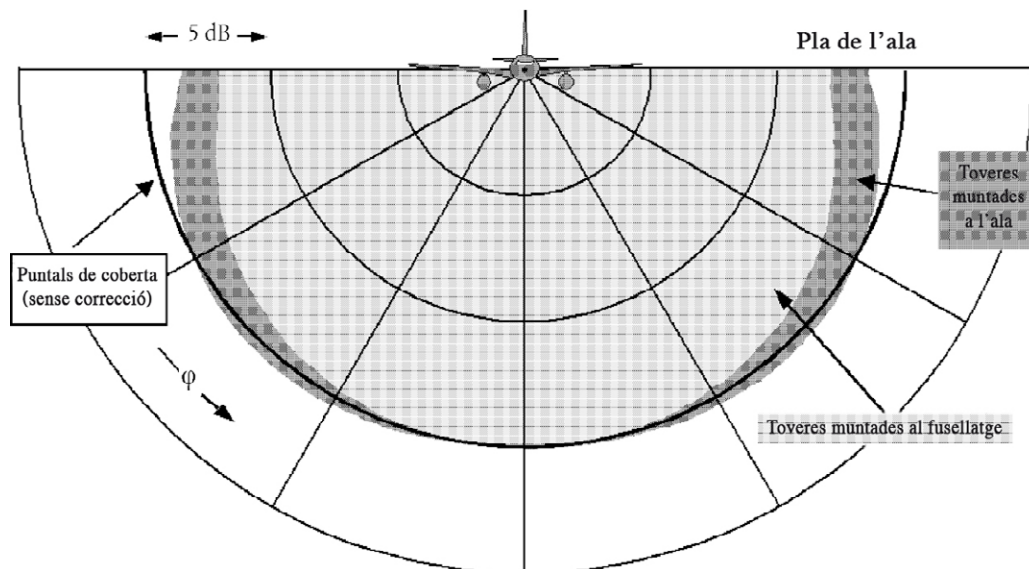
En el cas dels avions amb hèlix, les variacions de directivitat són insignificants i, per això, es pot suposar que:

$$\Delta_I(\varphi) = 0 \quad (2.7.38)$$

La **figura 2.7.n** mostra la variació de $\Delta_I(\varphi)$ sobre l'eix de balanceig de l'avió per a les tres instal·lacions del motor. Aquestes relacions empíriques les ha obtingut la SAE a partir de mesuraments empírics efectuats principalment sota de l'ala. Fins que s'hagin analitzat les dades de l'ala superior, es recomana que, per a φ negatiu, $\Delta_I(\varphi) = \Delta_I(0)$ per a totes les instal·lacions.

²³ Si es tracta de terreny no pla, es poden donar definicions diferents de l'angle d'elevació. En aquest cas, es defineix mitjançant una altura de l'avió superior al punt d'observació i a la distància obliqua, de tal manera que s'ignorin els pendents del terreny local i els obstacles de la trajectòria de propagació sonora (vegeu les seccions 2.7.6 i 2.7.10). En cas que, a causa de l'elevació del terreny, el punt del receptor estigui per sobre de l'avió, l'angle d'elevació β és igual a zero.

Figura 2.7.n
Directivitat lateral dels efectes de la instal·lació



Se suposa que $\Delta_I(\varphi)$ és bidimensional; és a dir, no depèn de cap altre paràmetre, i en particular que no varia amb la distància longitudinal a l'observador de l'avió. Això significa que l'angle d'elevació β per a $\Delta_I(\varphi)$ es defineix com $\beta = \tan^{-1}(z/\ell)$. Això s'adopta per facilitar la modelització fins que es coneguin millor els mecanismes; en realitat, els efectes de la instal·lació estan obligats a ser substancialment tridimensionals. Malgrat això, es justifica un model bidimensional pel fet que els nivells de l'esdeveniment tendeixen a estar dominats pel soroll radiat cap als costats des del segment més proper.

Atenuació lateral $\Lambda(\beta, \ell)$ (trajectòria de vol infinita).

Els nivells d'esdeveniments NPD tabulats estan relacionats amb un vol anivellat uniforme i, en general, es basen en mesuraments efectuats a 1,2 m sobre el nivell d'un terreny tou sota l'avió; el paràmetre de la distància es desenvolupa efectivament per sobre de la superfície del terreny. Se suposa que els efectes de la superfície en els nivells de soroll de l'esdeveniment sota l'avió, que poden fer que els nivells tabulats difereixin dels valors de camp lliure,²⁴ són inherents a les dades (és a dir, en el perfil de les corbes nivell de soroll-distància).

En els costats de la trajectòria del vol, el paràmetre de la distància és la distància obliqua mínima —la longitud de la normal des del receptor fins a la trajectòria del vol—. En qualsevol posició, el nivell de soroll en general és inferior a la mateixa distància immediatament sota l'avió. A part de la directivitat lateral o dels efectes de la instal·lació descrits anteriorment, una atenuació lateral excessiva fa que el nivell de so disminueixi amb més rapidesa amb la distància en comparació amb el que indiquen les corbes NPD. La Societat d'Enginyers Tècnics d'Automoció (SAE) va desenvolupar un mètode que anteriorment s'utilitzava àmpliament per a la modelització de la propagació lateral del soroll de l'avió en AIR-1751 i els algorismes descrits a continuació es basen en les millores d'AIR-5662 que actualment recomana la SAE. L'atenuació lateral és un efecte de reflexió, a causa de la interferència entre el so directament radiat i que es reflecteix des de la superfície. Depèn de la naturalesa de la superfície i pot causar reduccions significatives dels nivells de so observats per a angles d'elevació baixos. També es veu fortament afectada per la refracció del so, uniforme o no uniforme, causada per les turbulències i els gradients de vent i temperatura que s'atribueixen a la presència de la superfície.²⁵ El mecanisme de la reflexió del terreny es coneix força bé i, per a condicions de la superfície i atmosfèriques uniformes, en teoria es pot descriure amb certa precisió. No obstant això, la manca d'uniformitats de la superfície i de les condicions atmosfèriques —que no són susceptibles d'anàlisis teòriques senzilles— tenen un efecte profund en l'efecte de reflexió, de manera que tendeix a «estendre's» a angles d'elevació més alts; per tant, la teoria és d'aplicabilitat limitada. SAE continua treballant per comprendre millor els efectes de la superfície, i s'espera que això derivi en models millorats. Fins que no ho aconseguim, es recomana la

²⁴ Un nivell de «camp lliure» és el que s'observaria si la superfície de terra no estigués aquí.

²⁵ Les turbulències i els gradients de temperatura i vent depenen en certa mesura de les característiques de la rugositat i la transferència tèrmica de la superfície.

metodologia següent, descrita a AIR-5662, per calcular l'atenuació lateral. Es limita al cas de la propagació sonora sobre una superfície anivellada tova que és apropiada per a la majoria dels aeroports civils. Encara s'estan desenvolupant els ajustos per tenir en compte una superfície del terreny dura (o, el que és el mateix en termes acústics, l'aigua).

La metodologia es basa en dades experimentals sobre la propagació sonora des d'una aeronau amb motors muntats al fusellatge en un vol anivellat, constant i recte (sense viratges) registrat inicialment a AIR-1751. Suposant que, per a vols anivellats, l'atenuació aire-terra depèn i) de l'angle d'elevació β mesurat en el pla vertical i ii) del desplaçament lateral respecte a la trajectòria en terra de l'avió ℓ , les dades es van analitzar per obtenir una funció empírica per a l'ajust lateral total $\Lambda_T(\beta, \ell)$ (= nivell de l'esdeveniment lateral menys el nivell a la mateixa distància sota l'avió).

Com que el terme $\Lambda_T(\beta, \ell)$ representava la directivitat lateral i l'atenuació lateral, l'última es pot extreure mitjançant sostracció. Descriuint la directivitat lateral mitjançant l'equació 2.7.37, amb coeficients establerts per a jets muntats al fusellatge i amb φ reemplaçat per β (apropiat per a vols sense viratge), l'atenuació lateral resulta:

$$\Lambda(\beta, \ell) = \Lambda_T(\beta, \ell) - \Delta_I(\beta) \quad (2.7.39)$$

on β i ℓ es mesuren tal com il·lustra la **figura 2.7.m** en un pla normal a la trajectòria de vol infinita que, per a vols anivellats, també és vertical.

Encara que $\Lambda(\beta, \ell)$ es podria calcular directament mitjançant l'equació 2.7.39 amb $\Lambda_T(\beta, \ell)$ obtingut d'AIR-1751, es recomana una relació més eficient. Es tracta de l'aproximació empírica següent adaptada des d'AIR-5662:

$$\Lambda(\beta, \ell) = \Gamma(\ell) \cdot \Lambda(\beta) \quad (2.7.40)$$

on $\Gamma(\ell)$ és un factor de distància obtingut mitjançant:

$$\Gamma(\ell) = 1,089 \cdot [1 - \exp(-0,00274\ell)] \quad \text{per a } 0 \leq \ell \leq 914 \text{ m} \quad (2.7.41)$$

$$\Gamma(\ell) = 1 \quad \text{per a } \ell > 914 \text{ m} \quad (2.7.42)$$

i $\Lambda(\beta)$ és l'atenuació lateral aire-terra de llarga distància calculada mitjançant

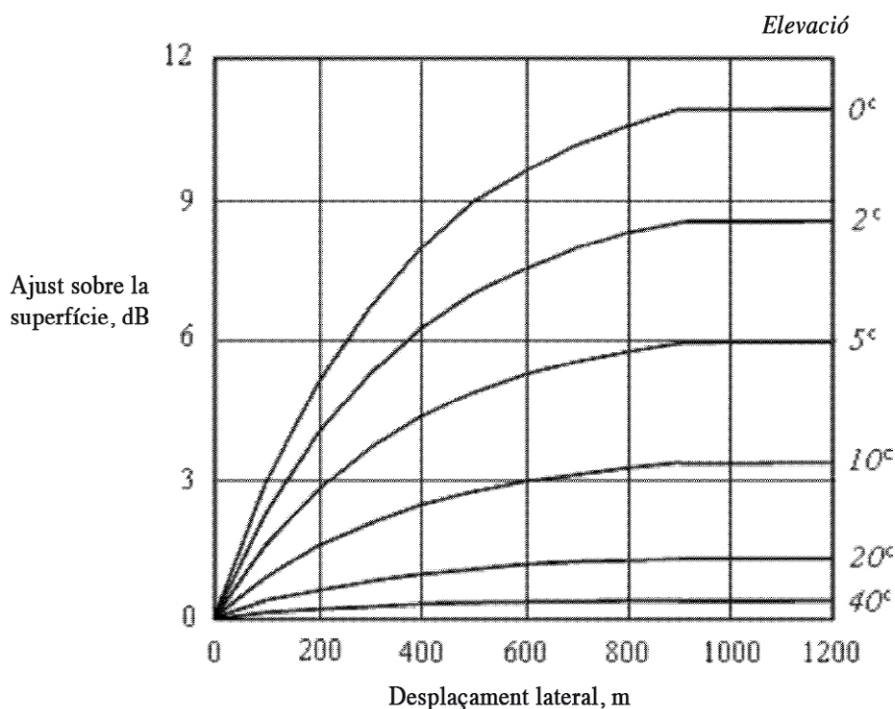
$$\Lambda(\beta) = 1,137 - 0,0229\beta + 9,72 \cdot \exp(-0,142\beta) \quad \text{per a } 0^\circ \leq \beta \leq 50^\circ \quad (2.7.43)$$

$$\Lambda(\beta) = 0 \quad \text{per a } 50^\circ \leq \beta \leq 90^\circ \quad (2.7.44)$$

L'expressió per a l'atenuació lateral $\Lambda(\beta, \ell)$, l'equació 2.7.40, que se suposa que s'ajusta bé per a tots els avions, avions amb hèlix i avions amb muntatge al fusellatge i a les ales, s'il·lustra gràficament a la **figura 2.7.o**.

En determinades circumstàncies (amb terreny), és possible que β sigui inferior a zero. En aquests casos, es recomana que $\Lambda(\beta) = 10,57$.

Figura 2.7.o
Variació de l'atenuació lateral $\Lambda(\beta, \ell)$ amb la distància i l'angle d'elevació



Atenuació lateral de segments finits.

Les equacions 2.7.41 a 2.7.44 descriuen l'atenuació lateral $\Lambda(\beta, \ell)$ del so que arriba a l'observador des de l'avió en un vol uniforme al llarg d'una trajectòria de vol anivellada i infinita. Quan s'apliquen a segments de trajectòria finits que no estan anivellats, l'atenuació s'ha de calcular per a una trajectòria anivellada equivalent—ja que el punt més proper d'una extensió simple del segment inclinat (que passa a través de la superfície de terra en un punt determinat) normalment no ofereix un angle d'elevació apropiat β .

La determinació de l'atenuació lateral per a segments finits difereix significativament per als índexs L_{\max} i L_E . Els nivells màxims del segment L_{\max} es determinen a partir de les dades NPD com una funció de la distància de propagació d a partir del punt més proper del segment; no cal fer correccions per tenir en compte les dimensions del segment. Així mateix, se suposa que l'atenuació lateral L_{\max} depèn només de l'angle d'elevació del mateix punt i també de la distància de terreny. Per tant, només es necessiten les coordenades del punt esmentat. Però, per a L_E , el procés és més complicat.

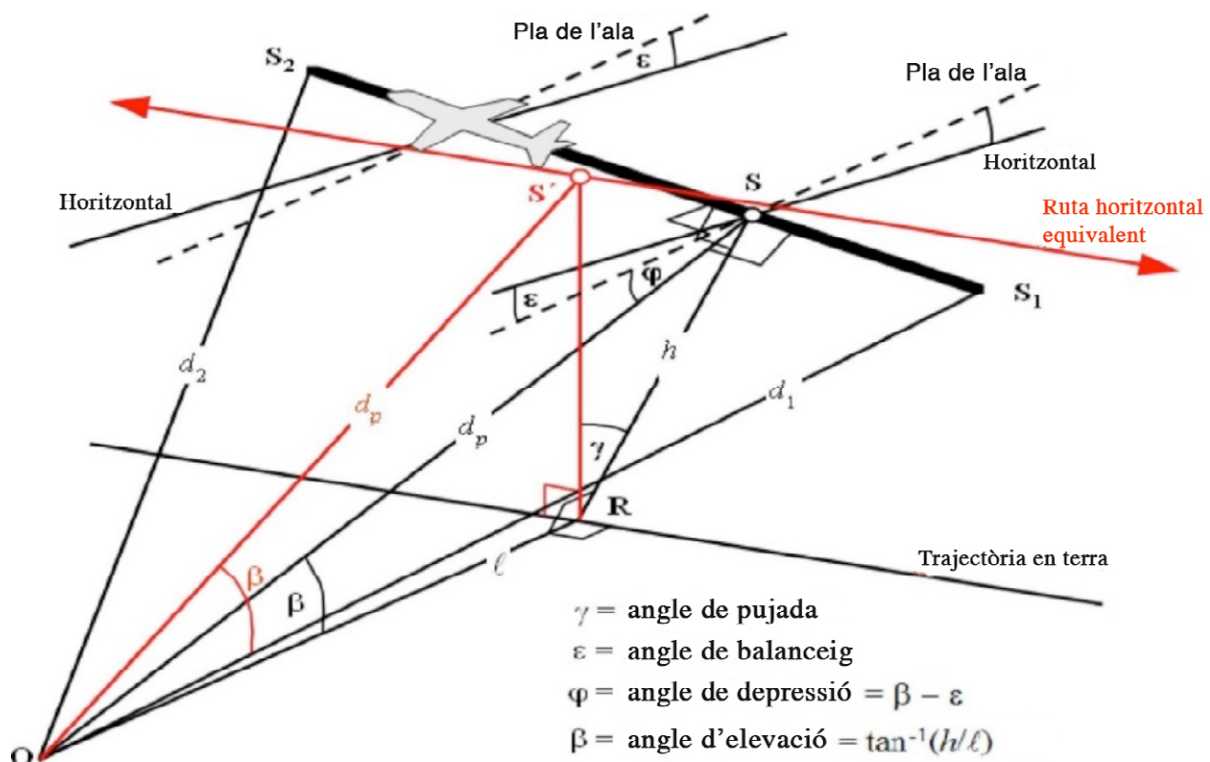
El nivell de l'esdeveniment bàsic $L_E(P, d)$ determinat a partir de les dades NPD, fins i tot per a paràmetres de segments finits, es refereix a una trajectòria de vol infinita. Evidentment, el nivell d'exposició sonora de l'esdeveniment, $L_{E, \text{seg}}$, és evidentment inferior al nivell bàsic—atesa la correcció del segment finit definida més endavant a la secció 2.7.19—. Aquesta correcció, una funció de la geometria de triangles OS_1S_2 tal com reflecteixen les figures 2.7.j a 2.7.l, defineix quina proporció de l'energia sonora total de la trajectòria infinita rebuda en O procedeix del segment; s'aplica la mateixa correcció, independentment que hi hagi o no alguna atenuació lateral. Però totes les atenuacions laterals s'han de calcular per a la trajectòria de vol infinita, és a dir, com una funció del seu desplaçament i la seva elevació, però no per al segment finit.

Sumant les correccions Δ_V i Δ_I , i restant l'atenuació lateral $\Lambda(\beta, \ell)$ al nivell bàsic NPD s'obté el nivell de soroll de l'esdeveniment ajustat per a un vol anivellat uniforme equivalent sobre una trajectòria recta infinita adjacent. No obstant això, els segments de la trajectòria de vol real modelitzats, els que afecten les corbes de nivell de soroll, rarament estan anivellats; l'avió sol ascendir o descendir.

La figura 2.7.p il·lustra un segment de sortida S_1S_2 —l'avió ascendeix a un angle γ —, però les consideracions són molt similars per a una arribada. No es mostra la resta de la trajectòria de vol «real»; n'hi ha prou amb destacar que S_1S_2 representa només una part de tota la trajectòria (que en general és corbada). En aquest cas, l'observador O és a un costat del segment i a la seva esquerra. L'avió experimenta un moviment de balanceig (moviment en sentit contrari a les agulles del rellotge sobre la trajectòria del vol) a

un angle ε en l'eix horitzontal lateral. L'angle de depressió φ des del pla de l'ala, del qual l'efecte de la instal·lació Δ_1 és una funció (equació 2.7.39), es troba en el pla normal de la trajectòria del vol en què es defineix ε . Per tant, $\varphi = \beta - \varepsilon$, on $\beta = \tan^{-1}(h/\ell)$ i ℓ és la distància perpendicular **OR** des de l'observador fins a la trajectòria en terra; és a dir, el desplaçament lateral de l'observador.²⁶ El punt d'aproximació més pròxim de l'avió a l'observador, **S**, es defineix mitjançant la perpendicular **OS**, de longitud (distància obliqua) d_p . El triangle **OS₁S₂** s'até a la il·lustració de la **figura 2.7.k**, la geometria per calcular la correcció del segment Δ_F .

Figura 2.7.p
Observador a un costat del segment

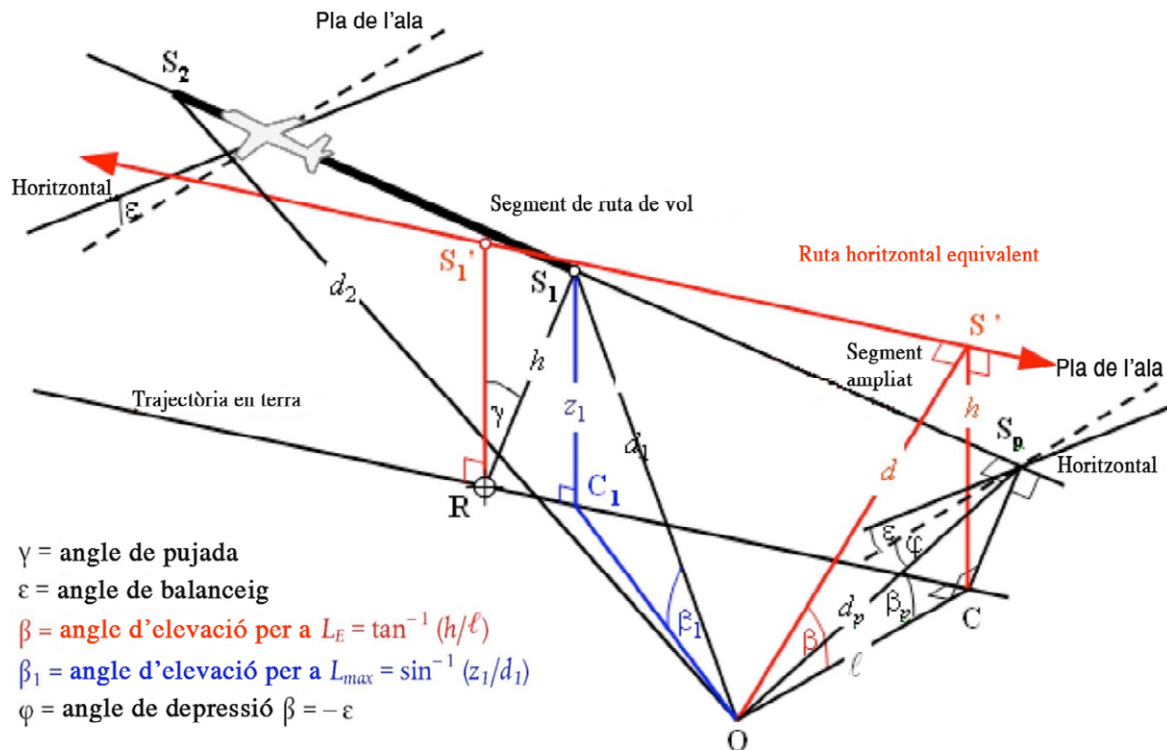


Per calcular l'atenuació lateral mitjançant l'equació 2.7.40 (on β es mesura en un pla vertical), una trajectòria de vol anivellat equivalent es defineix en el pla vertical a través de **S₁S₂** i amb la mateixa distància obliqua perpendicular d_p des de l'observador. Això es visualitza girant el triangle **ORS**, i la seva trajectòria de vol relacionada, sobre **OR** (vegeu la **figura 2.7.p**) girant-lo un angle γ , de manera que es forma el triangle **ORS'**. L'angle d'elevació d'aquesta trajectòria anivellada equivalent (ara en un pla vertical) és $\beta = \tan^{-1}(h/\ell)$ (ℓ roman invariable). En aquest cas, amb l'observador al costat, l'atenuació lateral $\Lambda(\beta, \ell)$ és la mateixa per als índexs L_E i L_{max} .

La **figura 2.7.q** il·lustra la situació quan el punt de l'observador **O** es troba darrere del segment finit, i no a un costat. En aquest cas, el segment s'observa com un tram més distant d'una trajectòria infinita; només es pot dibuixar una perpendicular fins al punt **S_p** sobre la seva extensió. El triangle **OS₁S₂** s'até al que il·lustra la **figura 2.7.j** que defineix la correcció del segment Δ_F . No obstant això, en aquest cas, els paràmetres de la directivitat lateral i de l'atenuació són menys evidents.

²⁶ Si es tracta d'un observador ubicat al lateral dret del segment φ , resultaria $\beta + \varepsilon$ (vegeu la secció 2.7.19).

Figura 2.7.q
Observador darrere del segment



Convé recordar que, considerada als efectes de modelització, la directivitat lateral (efecte de la instal·lació) és bidimensional, l'angle de depressió definit φ es mesura en lateral a partir del pla de l'ala de l'avió. (El nivell de l'esdeveniment bàsic és el que resulta de la travessia de l'avió per la trajectòria de vol infinita representada mitjançant el segment ampliat). D'aquesta manera, es determina l'angle de depressió en el punt d'aproximació més pròxim, és a dir, $\varphi = \beta_p - \epsilon$ on β_p és l'angle S_pOC .

Per a índexs de nivell màxim, el paràmetre de distància NPD es considera com la distància més curta fins al segment, és a dir, $d = d_1$. Per a índexs del nivell d'exposició, es tracta de la distància més curta d_p de O a S_p sobre la trajectòria de vol ampliat; és a dir, el nivell interpolat a partir de les taules NPD és $L_{Ex}(P_1, d_p)$.

Els paràmetres geomètrics per a l'atenuació lateral també difereixen per als càlculs del nivell màxim i d'exposició. Per a índexs del nivell màxim, l'ajust $\Lambda(\beta, \ell)$ resulta de l'equació 2.7.40 amb $\beta = \beta_1 = \sin^{-1}(z_1/d_1)$ i $\ell = OC_1 = \sqrt{d_1^2 - z_1^2}$, on β_1 i d_1 es defineixen mitjançant el triangle OC_1S_1 en el pla vertical a través de O i S_1 .

Quan es calcula l'atenuació lateral dels segments aeris només i l'índex del nivell d'exposició, ℓ és el desplaçament lateral més curt des de l'extensió del segment (OC). No obstant això, per definir un valor apropiat de β , una vegada més és necessari visualitzar una trajectòria de vol anivellada equivalent (infinita), en què el segment es pugui considerar com una part integrant. Es dibuixa a través de S_1' , amb una altura h per sobre de la superfície, on h és igual a la longitud de RS_1 , la perpendicular des de la trajectòria en terra fins al segment. Això equival a la rotació de la trajectòria de vol real ampliat girant-la un angle γ sobre el punt R (vegeu la figura 2.7.q). En la mesura que R es trobi en la perpendicular a S_1 , el punt del segment més proper a O , la construcció de la trajectòria anivellada equivalent és la mateixa quan O és a un costat del segment.

El punt d'aproximació més pròxim de la trajectòria anivellada equivalent a l'observador **O** es troba a **S'**, amb una distància obliqua d , de tal manera que el triangle **OCS'** format en el pla vertical defineixi l'angle d'elevació $\beta = \cos^{-1}(\ell/d)$. Encara que aquesta transformació sembla ser força enrevessada, cal destacar que la geometria de la font bàsica (definida mitjançant d_1 , d_2 i φ) roman inalterada, el so que viatja des del segment cap a l'observador és simplement el que seria si tot el vol a través del segment inclinat amb una extensió infinita (del qual forma part el segment als efectes de modelització) es fes a una velocitat constant V i amb una potència P_1 . L'atenuació lateral del so des del segment rebuda per l'observador, d'altra banda, no està relacionada amb l'angle d'elevació β_p , de la trajectòria ampliada, sinó amb β , de la trajectòria anivellada equivalent.

El cas d'un observador davant del segment no es descriu separatament; és evident que es tracta bàsicament del mateix cas que quan l'observador és darrere.

No obstant això, per als índexs del nivell d'exposició en què les ubicacions de l'observador estan darrere dels segments en terra durant el rodatge abans de l'enlairament i les ubicacions que estan davant dels segments en terra durant el rodatge després de l'aterratge, el valor de β resulta ser el mateix que per als índexs de nivell màxim, és a dir, $\beta = \beta_1 = \sin^{-1}(z_1/d_1)$ i

$$\ell = OC_1 = \sqrt{d_1^2 - z_1^2}$$

Correcció de segments finits Δ_F (només per a nivells d'exposició L_E).

El nivell d'exposició al soroll bàsic ajustat està relacionat amb un avió que segueix un vol anivellat uniforme, recte i constant (encara que amb un angle de balanceig ε que està en consonància amb un vol recte). Amb l'aplicació de la correcció del segment finit (negativa) $\Delta_F = 10 \times \lg(F)$, on F és la fracció d'energia, s'ajusta encara més el nivell que s'aconseguiria si l'avió recorregués només el segment finit (o si fos totalment silenciosos per a la resta de la trajectòria de vol infinita).

El terme «fracció d'energia» té en compte la directivitat longitudinal pronunciada del soroll d'un avió i l'angle subtendit pel segment en la posició de l'observador. Malgrat que els processos que causen la direccionalitat són molt complexos, els estudis han revelat que les corbes de nivell de soroll resultants són bastant poc sensibles a les característiques direccionals precises assumides. L'expressió de Δ_F que s'indica a continuació es basa en un model dipolar de 90 graus de potència quarta. Se suposa que no es veu afectat per la directivitat lateral ni per l'atenuació. La manera com es troba la correcció es descriu detalladament a l'**apèndix E**.

La fracció d'energia F és una funció de la «vista» de triangle **OS₁S₂** definida a les **figures 2.7.j a 2.7.l** com:

$$\Delta_F = 10 \cdot \lg \left[\frac{1}{\pi} \left(\frac{\alpha_2}{1 + \alpha_2^2} + \arctan \alpha_2 - \frac{\alpha_1}{1 + \alpha_1^2} - \arctan \alpha_1 \right) \right] \quad (2.7.45)$$

Amb

$$\alpha_1 = -\frac{q}{d_\lambda}; \quad \alpha_2 = -\frac{q - \lambda}{d_\lambda}; \quad d_\lambda = d_0 \cdot 10^{[L_{E\infty}(P,d_p) - L_{\max}(P,d_p)]/10}; \quad d_0 = \frac{2}{\pi} \cdot V_{ref} \cdot t_0.$$

on d_λ es considera com la «distància a escala» (vegeu l'**apèndix E**). S'ha de tenir en compte que $L_{\max}(P,d_p)$ és el nivell màxim, a partir de les dades de NPD, per a la distància perpendicular d_p , NO el segment L_{\max} .

És aconsellable aplicar un límit inferior de — 150 dB a Δ_F .

En el cas particular que les ubicacions de l'observador es trobin darrere de cada segment de rodatge de desplaçament en terra abans de l'enlairament i de cada segment de desplaçament en terra ferma en l'aterratge, s'utilitza una forma reduïda de la fracció del soroll expressada en l'equació 2.7.45, que es correspon amb el cas específic de $q = 0$. Això es calcula de la manera següent:

$$\Delta_F = 10 \log_{10} \left[\left(\frac{1}{\pi} \right) \left[\alpha_2 / (1 + \alpha_2^2) + \tan^{-1} \alpha_2 \right] 10^{ASOR/10} \right] \quad (2.7.46)$$

on $\alpha_2 = \lambda/d_\lambda$ i Δ_{SOR} és la funció de la directivitat del punt de partida de rodatge definida per les equacions 2.7.51 i 2.7.52.

El plantejament per utilitzar aquesta forma particular de la fracció de soroll s'explica més a fons a la secció següent, com a part del mètode de l'aplicació de la directivitat del punt de partida de rodatge.

Tractaments específics dels segments de desplaçaments en terra, inclosa la funció de la directivitat del punt de partida de rodatge Δ_{SOR} .

En el cas dels segments de desplaçament en terra ferma, tant per a l'enlairament com per a l'aterratge, s'apliquen tractaments específics, que es descriuen a continuació.

Funció de la directivitat d'inici de rodatge Δ_{SOR} .

El soroll del reactor —en particular els equipats amb motors amb una relació de derivació inferior— mostra un model de radiació lobulada en l'arc posterior, que és característic del soroll d'escapament del reactor. Aquest model és més important com més alta sigui la velocitat del reactor i més baixa sigui la velocitat de l'avió. Això té una importància particular per a les ubicacions de l'observador darrere del punt de partida de rodatge, quan es compleixin ambdues condicions. Aquest efecte es té en compte mitjançant una funció de directivitat Δ_{SOR} .

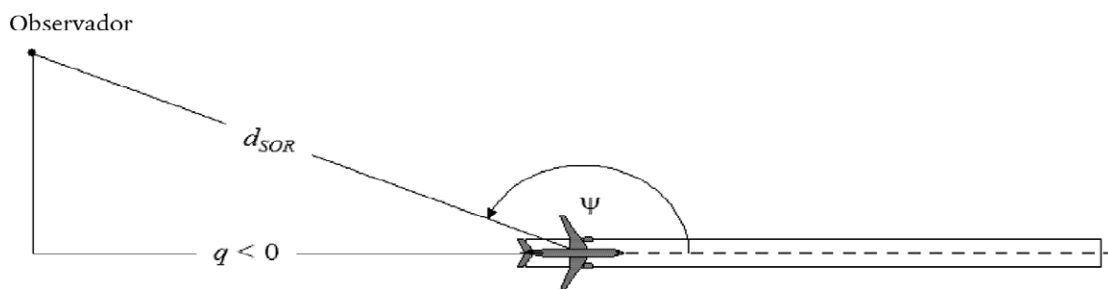
La funció Δ_{SOR} s'ha calculat a partir de diverses campanyes de mesuraments de soroll mitjançant la utilització de micròfons correctament col·locats darrere i al lateral del punt de partida de rodatge del reactor que es disposa a sortir.

La **figura 2.7.r** il·lustra la geometria pertinent. L'angle d'azimut ψ entre l'eix longitudinal de l'avió i el vector per a l'observador es defineix de la manera següent:

$$\psi = \arccos\left(\frac{q}{d_{SOR}}\right). \quad (2.7.47)$$

La distància relativa q és negativa (vegeu la **figura 2.7.j**), de tal manera que els intervals ψ des de 0° en la direcció de l'avió que segueix el seu rumb fins a 180° en la direcció inversa.

Figura 2.7.r
Geometria en terra de l'observador de l'avió per a l'estimació de la correcció de la directivitat



La funció Δ_{SOR} representa la variació del soroll total que produeix el desplaçament en terra ferma abans de l'enlairament mesurat darrere el punt de partida de rodatge, en relació amb el soroll total del desplaçament en terra ferma abans de l'enlairament mesurat en el lateral del punt de partida de rodatge, a la mateixa distància:

$$L_{TGR}(d_{SOR}, \psi) = L_{TGR}(d_{SOR}, 90^\circ) + \Delta_{SOR}(d_{SOR}, \psi) \quad (2.7.48)$$

on $L_{TGR}(d_{SOR}, 90^\circ)$ és el nivell de soroll general del desplaçament en terra ferma abans de l'enlairament que generen tots els segments del desplaçament en terra ferma abans de l'enlairament a la distància puntual d_{SOR} al lateral del punt de partida de rodatge. A distàncies d_{SOR} inferiors a la distància normalitzada $d_{SOR,0}$, la funció de la directivitat del punt de partida de rodatge s'obté de:

$$\Delta_{SOR}^0 = 51,47 - 1,553 \cdot \psi + 0,015147 \cdot \psi^2 - 0,000047173 \cdot \psi^3 \quad \text{si } 90^\circ \leq \psi < 148,4^\circ \quad (2.7.49)$$

$$\Delta_{SOR}^0 = 339,18 - 2,5802 \cdot \psi - 0,0045545 \cdot \psi^2 + 0,000044193 \cdot \psi^3 \quad \text{si } 148,4^\circ \leq \psi \leq 180^\circ \quad (2.7.50)$$

Si la distància d_{SOR} excedeix la distància de normalització $d_{SOR,0}$, la correcció de la directivitat es multiplica mitjançant un factor de correcció per tenir en compte el fet que la directivitat té menys importància per a distàncies més llargues de l'avió, és a dir:

$$\Delta_{SOR} = \Delta_{SOR}^0 \quad \text{si } d_{SOR} \leq d_{SOR,0} \quad (2.7.51)$$

$$\Delta_{SOR} = \Delta_{SOR}^0 \cdot \frac{d_{SOR,0}}{d_{SOR}} \quad \text{si } d_{SOR} > d_{SOR,0} \quad (2.7.52)$$

La distància de normalització $d_{SOR,0}$ és igual a 762 m (2.500 ft).

Tractament dels receptors ubicats darrere del segment de desplaçament en terra ferma en l'enlairament i en l'aterratge.

La funció Δ_{SOR} descrita anteriorment captura en gran mesura l'efecte de la directivitat pronunciada del tram inicial del rodatge en l'enlairament en ubicacions darrere de l'inici de rodatge (perquè es tracta del punt més proper als receptors, amb la màxima velocitat del reactor respecte a la relació de transmissió de l'avió). No obstant això, l'ús de Δ_{SOR} establert es «generalitza» per a les posicions darrere de cada segment individual de desplaçament en terra ferma, tant per a l'enlairament com per a l'aterratge, de manera que no tan sols es té en compte darrere del punt d'inici de rodatge (en el cas de l'enlairament).

Els paràmetres d_s i ψ es calculen en relació amb l'inici de cada segment individual de desplaçament en terra ferma.

El nivell de l'esdeveniment L_{seg} per a una ubicació darrere d'un segment de desplaçament en terra ferma en l'enlairament o en l'aterratge es calcula per complir amb els formalismes de la funció Δ_{SOR} : bàsicament es calcula per al punt de referència ubicat en el lateral del punt inicial del segment, a la mateixa distància d_s que el punt real, i s'ajusta encara més a Δ_{SOR} per obtenir el nivell de l'esdeveniment en el punt real.

Això significa que els diferents termes de correcció de les equacions següents han d'utilitzar els paràmetres geomètrics corresponents a aquest punt de referència ubicat en el lateral del punt inicial:

$$L_{max,seg} = L_{max}(P, d = d_s) + \Delta_I(\varphi) - \Lambda(\beta, l = d_s) + \Delta_{SOR} \quad (2.7.53)$$

$$L_{E,seg} = L_{E,\infty}(P, d = d_s) + \Delta_V + \Delta_I(\varphi) - \Lambda(\beta, l = d_s) + \Delta'_F + \Delta_{SOR} \quad (2.7.54)$$

on Δ'_F és la forma reduïda de la fracció de soroll expressada en l'equació $q = 0$ (ja que el punt de referència es troba en el lateral del punt inicial) i recordant que d_λ s'ha de calcular utilitzant d_s (i no d_p):

$$d_\lambda = d_0 \cdot 10^{\frac{L_{E,\infty}(P, d_s) - L_{max}(P, d_s)}{10}} \quad (2.7.55)$$

2.7.20. Nivell de soroll d'un esdeveniment L del moviment d'una aeronau de l'aviació general.

El mètode descrit a la secció 2.7.19 és aplicable a aeronaus d'aviació general amb motors de propulsió quan es tracten com avions d'aquest tipus respecte als efectes de la instal·lació del motor.

La base de dades ANP inclou entrades d'aeronaus de diverses aeronaus d'aviació general. Si bé es tracta del funcionament més comú de l'aeronau de l'aviació general, de vegades pot ser convenient utilitzar dades addicionals.

Si l'aeronau de l'aviació general específica no es coneix o no es troba a la base de dades d'ANP, es recomana utilitzar les dades més genèriques de l'aeronau, GASEPF i GASEPV, respectivament. Aquests conjunts de dades representen una aeronau petita d'aviació general d'un únic motor amb hèlixs de pas fix i hèlixs de pas variable, respectivament. Els quadres de les entrades es presenten a l'annex I (quadres I-11, I-17).

2.7.21. Mètode per calcular el soroll dels helicòpters.

Per calcular el soroll dels helicòpters, es pot utilitzar el mateix mètode de càlcul utilitzat per als avions d'ala fixa (descriu a la secció 2.7.14), sempre que els helicòpters es considerin com avions amb hèlixs i que no s'apliquin els efectes de la instal·lació del motor associats amb reactors. Els quadres de les entrades per a dos conjunts de dades diferents es presenten a l'annex I (quadres I-18, I-27).

2.7.22. Soroll associat amb operacions de proves del motor (prova en terra per a control), rodatge i unitats de potència auxiliars.

En els casos en què es consideri que el soroll associat amb les proves del motor i les unitats de potència auxiliars s'han de modelitzar, la modelització s'efectua segons les indicacions del capítol dedicat al soroll industrial. Encara que no se sol donar el cas, el soroll de les proves del motor de l'avió (el que de vegades es denomina «prova de motor a punt fix») als aeroports pot contribuir als impactes del soroll. Aquestes proves se solen efectuar als efectes d'enginyeria per comprovar el rendiment del motor, per a la qual cosa es col·loquen els avions en zones segures lluny dels edificis i dels moviments d'avions, vehicles i personal, a fi d'evitar danys originats pel raig del reactor.

Per motius addicionals per al control de la seguretat i del soroll, els aeroports, en particular els que disposen d'instal·lacions de manteniment que poden comportar assajos freqüents de motors, poden instal·lar les denominades «pantalles antisoroll», és a dir, recintes dotats amb deflectors en tres costats especialment, dissenyades per desviar i dissipar el soroll i el raig dels gasos de combustió. La investigació de l'impacte del soroll d'aquestes instal·lacions, que es pot atenuar i reduir mitjançant l'ús de murs de terra o barreres acústiques, és més senzilla si es tracta el recinte de proves com una font de soroll industrial i si s'utilitza un model apropiat de propagació sonora.

2.7.23. Càlcul dels nivells acumulats.

En les seccions 2.7.14 a 2.7.19 es descriu el càlcul del nivell de soroll de l'esdeveniment d'un moviment d'un avió en una única ubicació de l'observador. L'exposició al soroll total en aquesta ubicació es calcula mitjançant la suma dels nivells de l'esdeveniment de tots els moviments de l'avió significatius des del punt de vista del soroll, és a dir, tots els moviments, entrants i sortints, que influeixen en el nivell acumulat.

2.7.24. Nivells sonors continus equivalents ponderats.

Els nivells sonors continus equivalents ponderats en el temps, que tenen en compte tota l'energia sonora de l'avió rebuda, s'han d'expressar de manera genèrica mitjançant la fórmula:

$$L_{eq,W} = 10 \cdot \lg \left[\frac{t_0}{T_0} \cdot \sum_{i=1}^N g_i \cdot 10^{L_{E,i}/10} \right] + C \quad (2.7.56)$$

La suma s'efectua per a tots els esdeveniments sonors N durant l'interval de temps al qual s'aplica l'índex de soroll. $L_{E,i}$ és el nivell d'exposició al soroll d'esdeveniment simple de l'esdeveniment acústic i, g_i és un factor de ponderació que depèn del període del dia (que se sol definir per als períodes del dia, la tarda i la nit). Efectivament, g_i és un multiplicador del nombre de vols que es produeixen durant els períodes específics. La constant C pot tenir significats diferents (constant de normalització, ajust estacional, etc.).

Utilitzant la relació

$$g_i = 10^{\Delta_i/10}$$

on Δ_i és la ponderació en decibels per al període i ; es pot tornar a definir l'equació 2.7.56 com:

$$L_{eq,W} = 10 \cdot \lg \left[\frac{t_0}{T_0} \sum_{i=1}^N 10^{(L_{E,i} + \Delta_i)/10} \right] + C \quad (2.7.57)$$

és a dir, la consideració del dia s'expressa mitjançant un increment addicional del nivell.

2.7.25. Nombre ponderat d'operacions.

El nivell de soroll acumulat es calcula mitjançant la suma de les contribucions de tots els tipus o les categories diferents d'avions utilitzant les diferents rutes aèries que conformen l'escenari de l'aeroport.

Per descriure aquest procés de suma, s'introdueixen els subíndexs següents:

- i índex del tipus o la categoria de l'avió
- j índex de la trajectòria o subtrajectòria del vol (en cas que es defineixin subtrajectòries)
- k índex del segment de la trajectòria del vol

Molts índexs de soroll —especialment els nivells sonors continus equivalents— inclouen en la seva pròpia definició factors de ponderació del període del dia g_i (equacions 2.7.56 i 2.7.57).

El procés de suma es pot simplificar mitjançant la introducció d'un «nombre ponderat d'operacions»

$$M_{ij} = (g_{day} \cdot N_{ij,day} + g_{evening} \cdot N_{ij,evening} + g_{night} \cdot N_{ij,night}) \quad (2.7.58)$$

Els valors N_{ij} representen els nombres d'operacions del tipus o la categoria d'avió i en la trajectòria (o subtrajectòria) j durant el dia, la tarda i la nit, respectivament.²⁷

A partir de l'equació (2.7.57), el nivell d (genèric) el nivell sonor continu equivalent acumulatiu L_{eq} en el punt d'observació (x,y) és

$$L_{eq,W}(x,y) = 10 \cdot \lg \left[\frac{t_0}{T_0} \cdot \sum_i \sum_j \sum_k M_{ij} \cdot 10^{L_{E,ijk}(x,y)/10} \right] + C \quad (2.7.59)$$

T_0 és el període de temps de referència. Depèn de la definició específica de l'índex ponderat utilitzat (p. ex. L_{DEN}), així com dels factors de ponderació (per exemple, L_{DEN}). $L_{E,ijk}$ és la contribució del nivell d'exposició al soroll d'esdeveniment simple del segment k de la trajectòria o subtrajectòria j per a l'operació d'un avió de la categoria i . El càlcul de $L_{E,ijk}$ es descriu de manera detallada a les seccions 2.7.14 a 2.7.19.

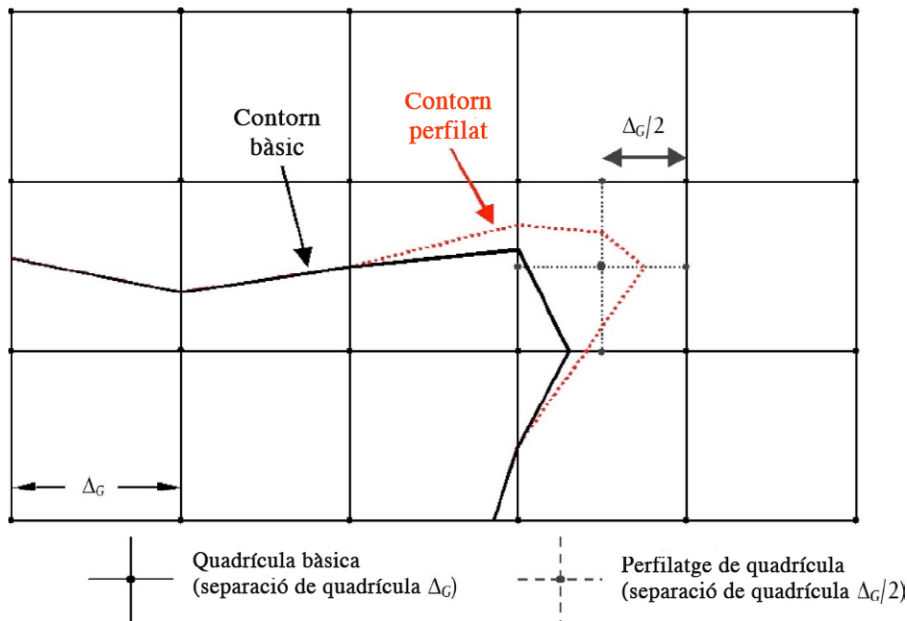
2.7.26. Càlcul i ajust d'una malla estàndard.

Quan les corbes de nivell de soroll (isòfones) s'obtenen mitjançant la interpolació entre els valors de l'índex en els punts d'una malla en forma rectangular, la seva precisió depèn de l'elecció de la separació de la quadrícula (o del pas de la malla) Δ_G , en particular a l'interior de les cel·les en què els gradients grans de la distribució espacial dels valors de l'índex causen una forta curvatura de les isòfones (vegeu la **figura 2.7.s**). Els errors d'interpolació es redueixen disminuint el pas de malla, però a mesura que augmenta el

²⁷ Els períodes de temps poden diferir d'aquests tres, en funció de la definició de l'índex de soroll utilitzat.

nombre de punts de la quadrícula, també augmenta el temps de càlcul. L'optimització d'una malla de quadrícula regular implica equilibrar la precisió de la modelització i el temps d'execució.

Figura 2.7.s
Quadrícula estàndard i ajust de la quadrícula



Una millora important en l'eficàcia del càlcul que ofereix resultats més precisos és utilitzar una quadrícula irregular per ajustar la interpolació en cel·les importants. La tècnica, il·lustrada a la **figura 2.7.s**, consisteix a reforçar la malla localment, deixant invariable la major part de la quadrícula. Es tracta d'una operació molt senzilla, que s'aconsegueix amb els passos següents:

1. Es defineix una diferència del llindar d'ajust ΔL_R per a l'índex de soroll.
2. Es calcula la quadrícula bàsica per a una separació Δ_G .
3. Es comproven les diferències ΔL dels valors de l'índex entre els nusos adjacents de la xarxa.
4. Si hi ha alguna diferència $\Delta L > \Delta L_R$, es defineix una nova xarxa amb una separació $\Delta_G/2$ i es calculen els nivells dels nous nusos de la manera següent:

$$\text{si } \begin{cases} \Delta L \leq \Delta L_R \\ \Delta L > \Delta L_R \end{cases} \quad \text{es calcula el nou valor} \quad \begin{cases} \text{per interpolació lineal a partir de} \\ \text{nusos adjacents} \\ \text{recorrent directament a les dades} \\ \text{base utilitzades} \end{cases}$$

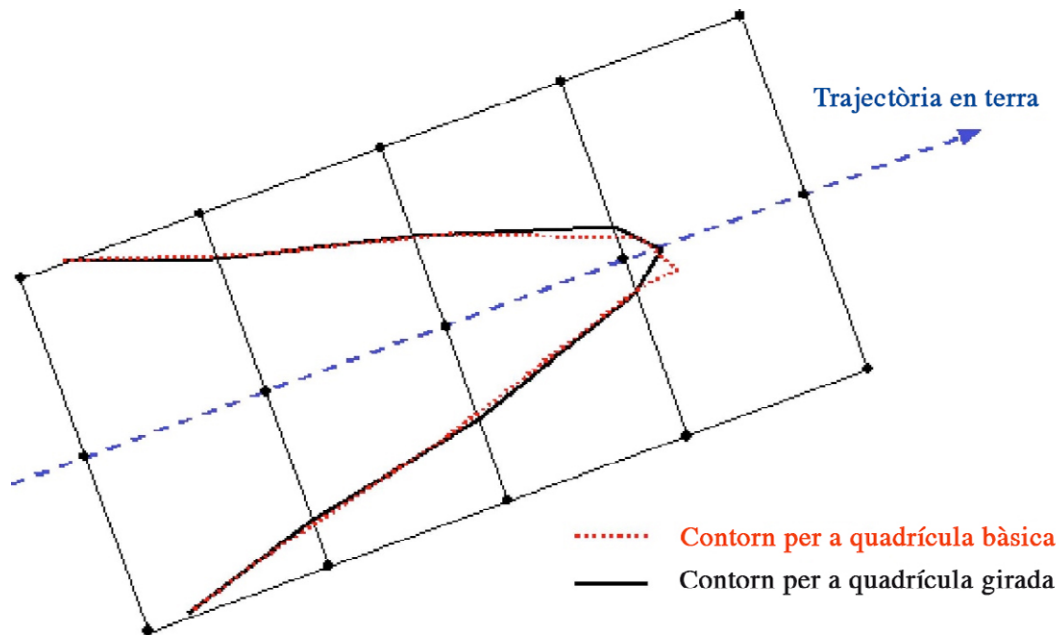
5. Es repeteixen els passos d'1 a 4 fins que totes les diferències siguin inferiors a la diferència del llindar.
6. Es calculen les isòfonas mitjançant una interpolació lineal.

Si la matriu dels valors d'índex s'ha d'agregar a d'altres (per exemple, quan es calculen índexs ponderats mitjançant la suma de corbes de nivell de soroll independents del dia, la tarda i la nit), és necessari procedir amb precaució per garantir que les xarxes independents siguin idèntiques.

2.7.27. Ús de malles girades.

En molts casos pràctics, la forma real de les corbes de nivell de soroll tendeix a ser simètrica respecte a la trajectòria en terra. No obstant això, si la direcció d'aquesta trajectòria no està alineada amb la malla de càlcul, això pot donar lloc a una forma d'isòfona asimètrica.

Figura 2.7.t
Ús d'una malla girada

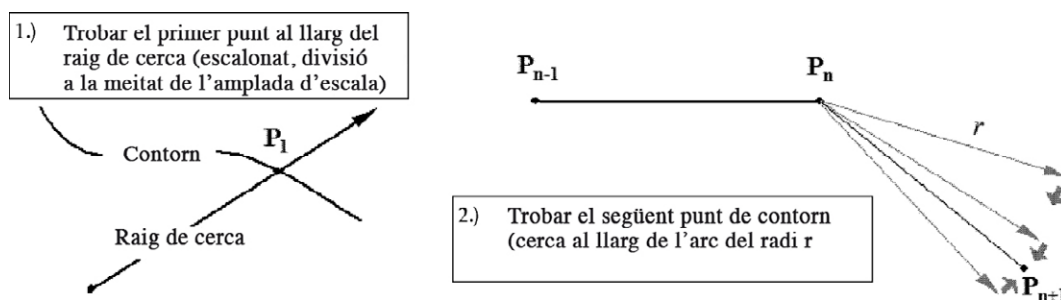


Una forma senzilla d'evitar aquest efecte és incrementar els nodes de la malla, però això augmenta el temps de càlcul. Una solució més elegant consisteix a girar la quadrícula de càlcul, de manera que la seva direcció sigui paral·lela a les trajectòries en terra principals (que solen ser paral·leles a la pista principal). La **figura 2.7.t** mostra l'efecte de la rotació de la malla en la forma de la isòfona.

2.7.28. Traçat de les corbes de nivell de soroll (isòfones).

Un algoritme molt eficaç en termes de temps que elimina la necessitat de calcular la matriu dels valors d'índex d'una malla completa a costa d'un càlcul una mica més complex és traçar la línia de les corbes de nivell de soroll, punt per punt. Aquesta opció requereix que s'apliquin i es repeteixin dos passos bàsics (vegeu la **figura 2.7.u**):

Figura 2.7.u
Concepte d'algoritme traçador

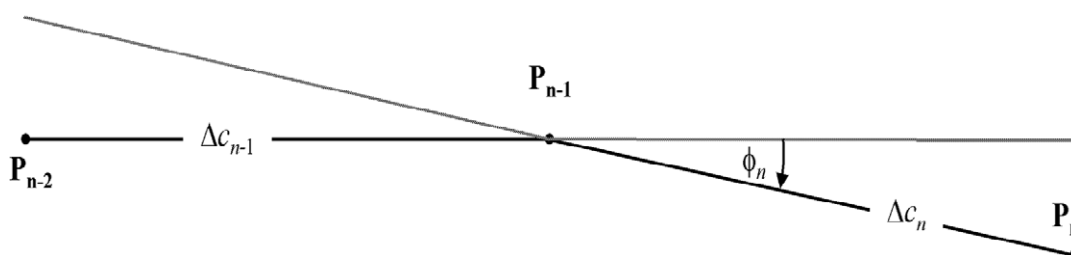


El pas 1 consisteix a trobar un primer punt P_1 d'una determinada isòfona. Per a això, es calculen els nivells de l'índex de soroll L en punts equidistants al llarg del «raig de cerca» que s'espera que encreui aquesta isòfona L_C . Quan aquesta s'encreua, la diferència

$\delta = L_C - L$ canvia de signe. Llavors, es divideix a la meitat l'amplada del pas al llarg del raig i s'inverteix la direcció de la cerca. El procés es repeteix fins que δ és més petit que el llindar de precisió predefinit.

El pas 2, que es repeteix fins que la corba de nivell de soroll està prou ben definida, consisteix a trobar el proper punt en el contorn L_C , que es troba a una distància en línia recta específica r del punt actual. Es procedeix amb passos angulars consecutius, i es calculen els nivells d'índex i les diferències δ en els extrems dels vectors que descriuen un arc amb radi r . De manera similar a l'anterior, quan es redueix a la meitat i s'inverteixen els increments, aquesta vegada en les direccions del vector, el proper punt del contorn es determina segons una precisió predefinida.

Figura 2.7.v
Paràmetres geomètrics que defineixen les condicions per a l'algoritme traçador



S'han d'imposar determinades restriccions per garantir que la corba de nivell de soroll es calcula amb un grau suficient de precisió (vegeu la **figura 2.7.v**):

- 1) La longitud de la corda Δc (la distància entre els dos punts de la corba de nivell de soroll) s'ha d'enquadrar dins d'un interval $[\Delta c_{\min}, \Delta c_{\max}]$, per exemple $[10 \text{ m}, 200 \text{ m}]$.
- 2) La proporció de longitud entre les dues cordes adjacents de longituds Δc_n i Δc_{n+1} s'ha de limitar, per exemple $0,5 < \Delta c_n / \Delta c_{n+1} < 2$.
- 3) Respecte a un bon ajust de la longitud de la corda a la curvatura de la isòfona, s'ha de complir la condició següent:

$$\Phi_n \max (\Delta c_n - 1, \Delta c_n) \leq \varepsilon \quad (\varepsilon \approx 15 \text{ m})$$

on f_n és la diferència en els rumbos de la corda.

L'experiència amb aquest algoritme ha revelat que, de mitjana, entre dos i tres valors d'índex s'han de calcular per determinar un punt de la corba amb una precisió superior a 0,01 dB.

Especialment quan s'han de calcular corbes de nivell àmplies, aquest algoritme accelera significativament el temps de càlcul. No obstant això, cal destacar que aquesta aplicació requereix experiència, sobretot quan una corba de nivell de soroll es divideix en illes separades.

2.8. Assignació de nivells de soroll i població als edificis.

Als efectes d'avaluar l'exposició de la població al soroll, només s'han de tenir en compte els edificis residencials. Per tant, no s'ha d'assignar cap persona a edificis que no siguin per a ús residencial, com ara col·legis, hospitals, edificis per a oficines o fàbriques. L'assignació de la població a edificis residencials s'ha de basar en les últimes dades oficials (en funció dels reglaments corresponents dels estats membres).

Tenint en compte que el càlcul del soroll de les aeronaus s'efectua per a una quadrícula amb una resolució $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$, en el cas específic del soroll d'aeronaus, els nivells s'han d'interpol·lar en funció dels nivells de soroll de la malla de càlcul més propera.

Determinació del nombre d'habitants d'un edifici.

El nombre d'habitants d'un edifici residencial és un paràmetre intermedi important per calcular l'exposició al soroll. Malauradament, aquestes dades no sempre estan disponibles. A continuació, s'especifica com es pot trobar aquest paràmetre a partir de dades que estan disponibles amb més freqüència.

Els símbols utilitzats a continuació són:

| | |
|------|---|
| BA | = superfície en planta de l'edifici |
| DFS | = superfície residencial útil |
| DUFS | = superfície residencial útil de cada habitatge |
| H | = altura de l'edifici |
| FSI | = superfície d'habitatge per habitant |
| Inh | = nombre d'habitants |
| NF | = nombre de plantes de l'edifici |
| V | = volum d'edificis residencials |

Per calcular el nombre d'habitants, s'ha d'utilitzar el procediment del cas 1 següent o el del cas 2, en funció de la disponibilitat de les dades.

CAS 1: les dades sobre el nombre d'habitants estan disponibles.

1A: es coneix el nombre d'habitants o s'ha calculat en funció del nombre d'habitatges. En aquest cas, el nombre d'habitants d'un edifici és la suma del nombre d'habitants de tots els habitatges de l'edifici:

$$Inh_{building} = \sum_{i=1}^n Inh_{dwelling_{unit_i}} \quad (2.8.1)$$

1B: el nombre d'habitants es coneix només per a entitats més grans que un edifici; per exemple, costats de les illes, illes, seccions censals i districtes o fins i tot un municipi sencer. En aquest cas, el nombre d'habitants d'un edifici es calcula en funció del volum de l'edifici:

$$Inh_{building} = \frac{V_{building}}{V_{total}} \times Inh_{total} \quad (2.8.2)$$

L'índex " aquí fa referència a l'entitat corresponent considerada. El volum de l'edifici és el producte de la seva superfície construïda i de la seva altura:

$$V_{building} = BA_{building} \times H_{building} \quad (2.8.3)$$

Si no es coneix l'altura de l'edifici, s'ha de calcular en funció del nombre de plantes $NF_{building}$, suposant una altura mitjana per planta de 3 m:

$$H_{building} = NF_{building} \times 3 \text{ m} \quad (2.8.4)$$

Si tampoc es coneix el nombre de plantes, s'ha d'utilitzar un valor per defecte per al nombre de plantes representatiu del districte o del municipi.

El volum total d'edificis residencials de l'entitat considerada V_{total} es calcula com la suma dels volums de tots els edificis residencials de l'entitat:

$$V_{total} = \sum_{i=1}^n V_{building_i} \quad (2.8.5)$$

CAS 2: no es troben disponibles les dades sobre el nombre d'habitants.

En aquest cas, el nombre d'habitants es calcula en funció de la superfície d'habitatge per habitant FSI. Si no es coneix aquest paràmetre, s'ha d'utilitzar un valor predeterminat nacional.

2A: la superfície residencial útil es coneix en funció del nombre d'habitatges. En aquest cas, el nombre d'habitants per habitatge es calcula de la manera següent:

$$Inh_{dwelling_{unit_i}} = \frac{DUFS_i}{FSI} \quad (2.8.6)$$

El nombre d'habitants de l'edifici ara es pot calcular com en el CAS 1A anterior.

2B: la superfície residencial útil es coneix per a tot l'edifici, és a dir, es coneix la suma de les superfícies de tots els habitatges de l'edifici. En aquest cas, el nombre d'habitants es calcula de la manera següent:

$$Inh_{building} = \frac{DFS_{building}}{FSI} \quad (2.8.7)$$

2C: la superfície residencial útil es coneix només per a les entitats més grans que un edifici; per exemple, illes, seccions censals i districtes o fins i tot un municipi sencer.

En aquest cas, el nombre d'habitants d'un edifici es calcula en funció del volum de l'edifici, tal com s'ha descrit en el CAS 1B anterior, on el nombre total d'habitants es calcula de la manera següent:

$$Inh_{total} = \frac{DFS_{total}}{FSI} \quad (2.8.8)$$

2D: es desconeix la superfície residencial útil. En aquest cas, el nombre d'habitants d'un edifici es calcula segons s'ha descrit en el CAS 2B anterior, on la superfície residencial útil es calcula de la manera següent:

$$DFS_{building} = BA_{building} \times 0,8 \times NF_{building} \quad (2.8.9)$$

El factor 0,8 és el factor de conversió superfície construïda -> superfície útil. Si es coneix un factor diferent com a representatiu de la superfície, s'ha d'utilitzar i s'ha de documentar amb claredat.

Si no es coneix el nombre de plantes de l'edifici, s'ha de calcular en funció de l'altura de l'edifici, $H_{building}$; el resultat d'aquest càlcul sol ser un nombre no enter de plantes:

$$NF_{building} = \frac{H_{building}}{3 \text{ m}} \quad (2.8.10)$$

Si no es coneixen l'altura de l'edifici ni el nombre de plantes, s'ha d'utilitzar un valor per defecte per al nombre de plantes representatiu del districte o del municipi.

Assignació de punts receptors a les façanes d'edificis.

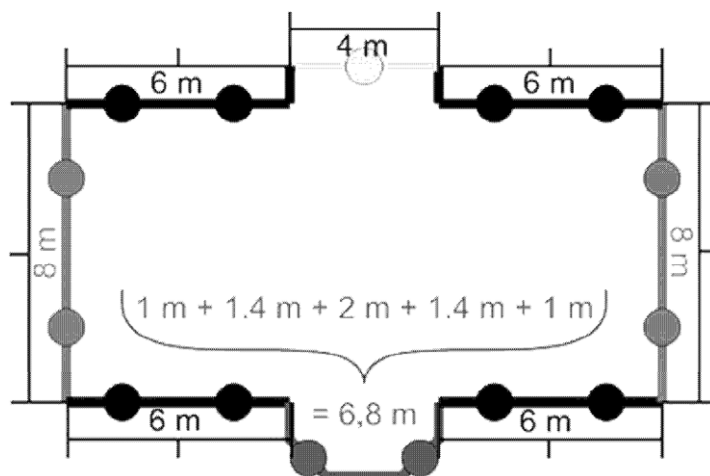
L'avaluació de l'exposició de la població al soroll es basa en els nivells de soroll en els punts receptors situats a 4 m per sobre del nivell del terreny a les façanes dels edificis residencials.

Per calcular el nombre d'habitants, s'ha d'utilitzar el procediment del cas 1 següent o el del cas 2 per a fonts de soroll terrestres. En cas que el soroll de les aeronaus es calculi segons el que indica la secció 2.6, s'associa tota la població d'un edifici al punt de càlcul de soroll més proper de la malla de càlcul.

CAS 1

Figura a

Exemple d'ubicació de receptors a les façanes d'un edifici, segons el procediment del CAS 1

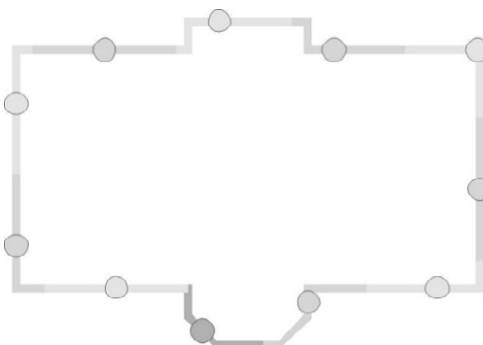


- Els segments amb una longitud de més de 5 m es divideixen en intervals regulars de la màxima longitud possible, però inferior o igual a 5 m. Els punts receptors es col·loquen al mig de cada interval regular.
- Els altres segments per sobre d'una longitud de 2,5 m es representen mitjançant un punt del receptor al mig de cada segment.
- Els altres segments adjacents amb una longitud total de més de 5 m es tracten de manera similar a com es descriu en els apartats a) i b).
- El nombre d'habitants assignat a un punt receptor s'ha de ponderar en funció de la longitud de la façana representada, de manera que la suma de tots els punts del receptor representi el nombre total d'habitants.
- Només per als edificis amb superfícies que indiquin un únic habitatge per planta, el nivell de soroll de la façana més exposat s'utilitza directament a efectes estadístics i està relacionat amb el nombre d'habitants.

CAS 2

Figura b

Exemple d'ubicació de receptors a les façanes d'un edifici, segons el procediment del CAS 2



- a) Les façanes es consideren separadament i es divideixen cada 5 m des del punt de partida considerat, amb una posició del receptor ubicada a la distància mitjana de la façana o del segment de 5 m.
- b) En l'últim segment restant, s'ha de col·locar un punt receptor al seu punt mig.
- c) El nombre d'habitants assignats a un punt receptor s'ha de ponderar en funció de la longitud de la façana representada, de manera que la suma de tots els punts del receptor representi el nombre total d'habitants.
- d) En el cas d'edificis amb només un habitatge per planta, s'assigna, a efectes estadístics, el nombre d'habitants a la façana més exposada.

3. DADES D'ENTRADA.

Les dades d'entrada que s'han d'utilitzar segons que correspongui amb els mètodes descrits anteriorment es faciliten als apèndixs F a I.

En els casos en què les dades d'entrada facilitades als apèndixs F a I no siguin aplicables o es desviïn del valor real que no compleixin les condicions presentades a les seccions 2.1.2 i 2.6.2, es poden utilitzar altres valors, sempre que els valors utilitzats i la metodologia aplicada per trobar-los estiguin prou documentats i se'n demostrï la validesa. Aquesta informació s'ha de posar a disposició del públic.

4. MÈTODES DE MESURAMENT.

En els casos en què, per algun motiu, s'efectuïn mesuraments, aquests s'han de portar a terme d'acord amb els principis que regeixen els mesuraments mitjans a llarg termini que estipulen les normes ISO 1996-1:2003 i ISO 1996-2:2007 o, en el cas del soroll d'aeronaus, la ISO 20906:2009.

APÈNDIXS:

Apèndix A: Requisits en matèria de dades.

Apèndix B: Càlculs de les performances de vol

Apèndix C: Modelització de l'extensió de dispersió lateral de la trajectòria en terra

Apèndix E: Correcció de segments finits

Apèndix F: Base de dades per a fonts de trànsit viari

Apèndix G: Base de dades per a fonts ferroviàries

Apèndix H: Base de dades per a fonts industrials

Apèndix I: Base de dades per a fonts associades a aeronaus — dades NPD