

4. MESURA DEL SOROLL

4.1. FACTORS QUE INTERVENEN

Per avaluar el soroll a una certa distància de la font sonora, no només s'ha de tenir en compte la mencionada font sonora sinó també les condicions en què es propaga l'ona sonora, ja que hi ha diversos factors que tenen incidència en la seva propagació.

La propagació del soroll és complexa i es pot complicar molt en funció dels factors que hi hagi presents: inversió tèrmica, vent, obstacles sòlids, arbres, arbustos, etc. Tots aquests aspectes, per tant, compliquen i intervenen de forma decisiva en el moment d'elaborar els mapes de soroll. A continuació es descriuen els principals factors a considerar:

4.1.1. Atenuació per la distància

El nivell d'intensitat sonora disminueix quan el receptor s'allunya de la font del soroll ja que l'energia, que és constant, s'ha de repartir en la superfície del front d'ona que augmenta. Aquesta atenuació dels nivells sonors s'anomena divergència geomètrica.

Quan el so es propaga, cal distingir dues situacions en funció de l'emissor del soroll: font sonora puntual i font sonora lineal. Una font sonora puntual propaga les ones uniformement en totes les direccions produint un front d'ones esfèric; si es tracta d'un medi de propagació homogeni, el nivell sonor disminueix 6 dBA cada vegada que es dobla la distància. En canvi, en una font sonora lineal les ones es propaguen de forma semicilíndrica: en aquest cas, en condicions homogènies, en duplicar la distància el nivell sonor disminueix 3 dBA. En concret, aquesta influència de la distància és té en compte amb la següent expressió:

$$L(r) = L(r_0) - 10 \cdot \log \frac{r}{r_0} \quad (4.1)$$

on: $L(r)$ = nivell sonor a la distància r
 $L(r_0)$ = nivell sonor a la distància r_0

Les distàncies compleixen $r > r_0$

4.1.2. Atenuació per l'absorció de l'aire

L'atenuació de les ones sonores en l'atmosfera real no segueix les lleis de la divergència geomètrica ja que l'aire no és un gas de densitat homogènia ni està en repòs absolut. Part de l'energia acústica és absorbida per l'aire en funció de la freqüència del so (les freqüències altes s'absorbeixen més fàcilment), la temperatura i la humitat de l'aire. Normalment varia dels 0,3 a 1 dBA per cada 100 metres recorreguts i per tant la reducció de soroll degut a aquest aspecte no comença a ser significativa fins a tenir distàncies de l'ordre de 500 metres.

4.1.3. Influència de la temperatura

La variació de la temperatura fa que variï la densitat de l'aire i, per tant, la velocitat de propagació de les ones. Si la temperatura decreix amb l'altitud, que és la situació normal, els raigs sonors es corben, ja que els fronts d'ones en la part inferior van més ràpids que en la part superior, i provoquen una zona d'ombra al voltant de la font. En inversions tèrmiques, on la temperatura augmenta amb l'altitud, s'elimina la zona d'ombra i podem tenir una variació d'uns 5 a 6 dBA en relació a la situació normal.

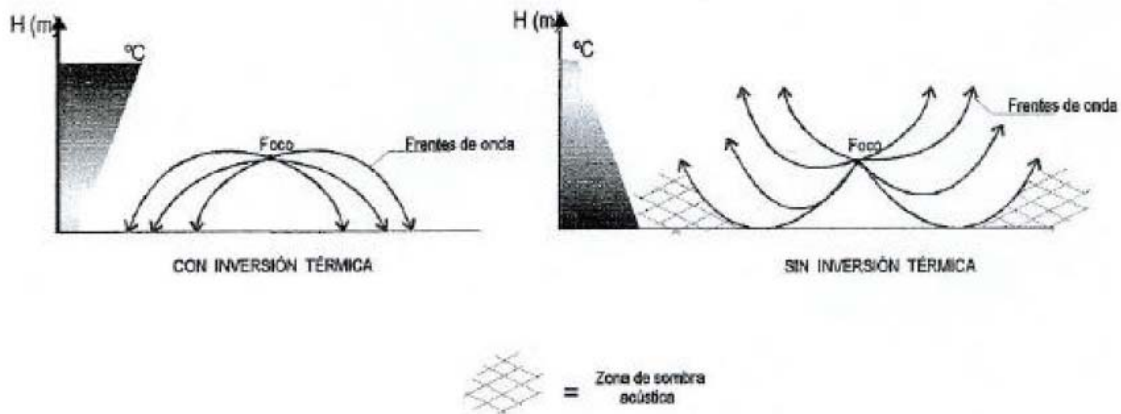


Figura 4.1 Influència de la temperatura en la propagació del so (extret de [1])

4.1.4. Influència del vent

La presència de vent provoca que el so es propagui seguint línies corbes enlloc de propagar-se en línia recta. El so es propaga millor en el sentit del vent, i els raigs sonors es corben cap al terra. Contra el vent, el so es propaga pitjor que en absència del mateix, i els raigs sonors es corben cap a dalt donant lloc, a una certa distància de la font (normalment superior a 200 metres), a una zona d'ombra. Per tenir un ordre de magnitud, la influència del vent pot originar variacions de l'ordre de 5 dBA.

L'atenuació deguda al vent és un fenomen bastant complicat, difícil de modelar i, en els casos en què existeixin vents dominants característics, és millor realitzar mesures directes per l'estimació del seu efecte sobre la propagació del soroll.

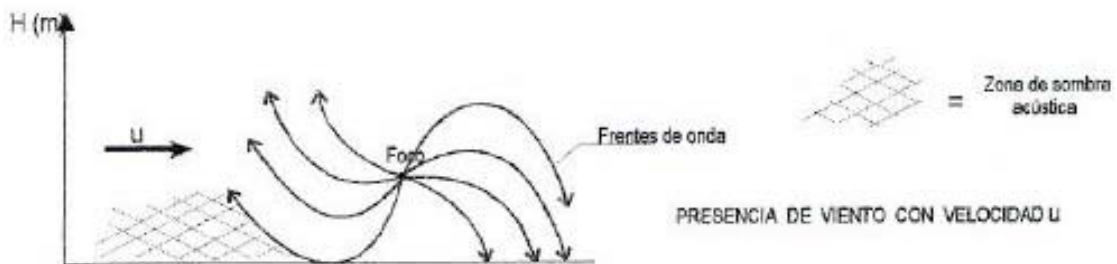


Figura 4.2 Efecte del vent en la propagació del so (extret de [1])

4.1.5. L'efecte dels obstacles

La presència d'obstacles sòlids en la trajectòria de les ones sonores produeix un apantallament. Quan una ona sonora troba un obstacle sòlid, una part de l'energia és reflectida per l'obstacle, una altra és absorbida pel mateix transformant-se en vibracions mecàniques i, finalment, la resta de l'energia voreja l'obstacle, produint-se una pertorbació del camp acústic per efecte de la difracció.

Un obstacle crea darrera seu una zona d'ombra amb nivells sonors sensiblement inferiors als existents davant degut a la difracció. La formulació matemàtica és complexa.

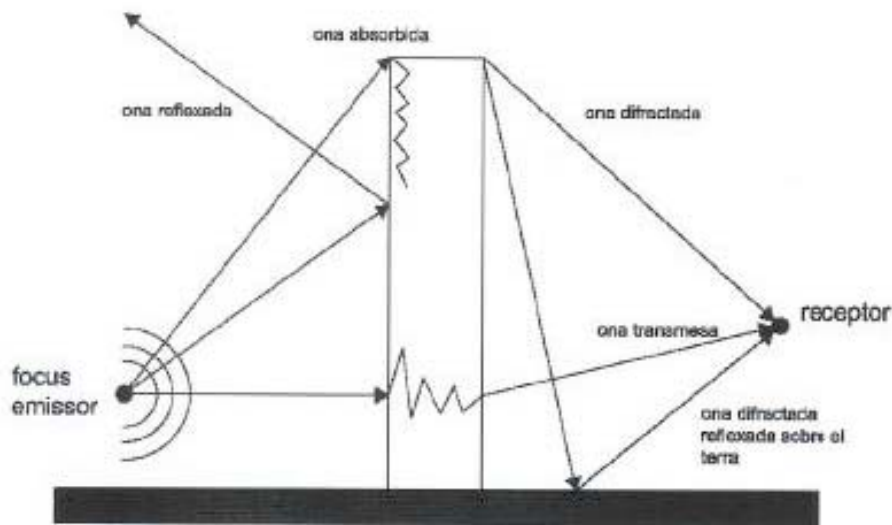


Figura 4.3 Influència dels obstacles en la propagació del so (extret de [1])

4.1.6. L'efecte del sòl

La presència d'un determinat tipus de terra pot produir alteracions en la propagació d'un so, les quals es coneixen amb el nom d'efecte sòl.

Per una banda, el terra actua com un obstacle sòlid, reflectint part de l'energia acústica i absorbint la resta. Per l'altra, existeixen en les proximitats del terra uns gradients de temperatura i humitat que varien al llarg del temps i que provoquen una disminució de la velocitat de propagació del so.

Aquesta situació fa que la llei d'atenuació dels nivells sonors amb la distància es vegi modificada per l'efecte sòl. Existeixen corbes experimentals que avaluen aquests efectes en funció de la distància de la font i el tipus de terra.

4.1.7. L'efecte de la vegetació

Els arbres i els arbustos situats entre una font sonora i un receptor poden atenuar el nivell sonor si intercepten la via de propagació acústica. Però per

què siguin efectius és necessari que tinguin una gran profunditat i densitat de fullatge. L'absorció és més eficient en el cas d'arbres de fulla perenne.

Malgrat això, quan es consideri aquest tipus d'atenuació s'ha de tenir en compte que el moviment de les fulles degut al vent pot produir nivells de soroll de fins a 50 dBA.

4.2. INDICADORS DE SOROLL

L'elecció d'un indicador òptim que permeti una correcta avaluació del soroll és un dels grans reptes als que s'han hagut d'enfrontar tant els organismes públics com estudiosos de tot el món a l'hora d'elaborar lleis i mètodes contra la contaminació acústica.

Les característiques principals que hauria de tenir un indicador del soroll serien les següents:

- Ha de ser aplicable en diferents àmbits i durant llargs períodes d'exposició.
- Ha de mostrar una adequada correlació entre el soroll i els seus efectes sobre l'individu i la societat.
- Ha de ser simple, precís i, al mateix temps, ser útil tant en la planificació com en l'elaboració de normatives o en l'experimentació.
- L'instrument capaç de mesurar-lo ha d'estar normalitzat i estar disponible comercialment.
- Seria molt convenient que estigués clarament relacionat amb els mètodes coneguts i habituals d'avaluació.
- El valor de l'indicador hauria de poder ser previst a partir del coneixement de les fonts i els fenòmens físics causants del soroll.
- L'indicador ha de ser mesurable mitjançant aparells autònoms situats en espais públics durant períodes prolongats.

A més, es fa imprescindible tenir en compte els diversos factors que influeixen en les molèsties que provoca el soroll. És necessari escollir un indicador que relacioni aquests factors adequadament. Aquest indicador ha de ser capaç de contemplar de manera clara i efectiva els següents aspectes que afecten de forma directa al soroll percebut:

- Energia sonora: les molèsties que produeix un soroll estan directament relacionades amb l'energia del mateix. A un soroll amb més energia (soroll més fort) li correspon un major grau de molèstia.
- Temps d'exposició: per a un mateix nivell de soroll, la molèstia depèn del temps al qual una determinada persona està exposada a aquest soroll. Normalment, per una mateixa intensitat, com més temps d'exposició més molèstia.
- Característiques del soroll: per un mateix nivell de soroll i temps d'exposició, la molèstia depèn de les característiques del so: espectre de freqüències, ritme, to, etc.

- El receptor: no totes les persones consideren el mateix grau de molèstia per al mateix soroll. Cada persona té una sensibilitat auditiva diferent i els factors culturals són també diferents entre els països i dins del mateix país.
- L'activitat del receptor: en funció de l'activitat que estigui realitzant el receptor, un mateix so pot ser considerat com a soroll o no. Per exemple, hi ha sons que de dia queden esmorteïts i per tant no molesten i, en canvi, de nit es converteixen en soroll.
- Les expectatives i la qualitat de vida: per certes persones les exigències de qualitat ambiental pel temps i els espais dedicats a l'oci són molt superiors a les d'altres situacions. Per exemple, en una segona residència s'accepta un nivell sonor molt inferior que en l'habitatge habitual.

Malgrat existir uns objectius clars respecte a l'indicador ideal, el fet que la legislació en el camp de la contaminació acústica sigui relativament recent fa que no existeixi una total unanimitat en relació a quins indicadors s'han de fer servir. Encara que la directiva europea 2002/49/CE, com es veurà més endavant, va fer certes recomanacions amb esperit homogeneïtzador, encara es continuen usant nombrosos paràmetres diferents per a l'avaluació del soroll. A continuació, es presenten i descriuen els indicadors de soroll més utilitzats en les diferents normatives existents.

4.2.1. Indicadors estadístics del soroll

L'estudi estadístic del soroll és útil per registrar variacions dels nivells acústics i per obtenir valors representatius del soroll en un determinat lloc i en un període de temps donat. Es basa en les funcions de distribució acumulada dels nivells sonors en determinats períodes de temps. Així, l'estudi estadístic es basa en paràmetres que indiquen el percentatge de temps en el qual es supera un determinat valor de soroll. Aquests paràmetres s'expressen de la següent manera:

$$L_n = \text{percentil } n, \text{ amb } n = 1,10,50,90,99 \% \text{ com a valors més habituals.} \quad (4.2)$$

Els diferents valors de n indiquen el tant per cent del temps en què es supera el valor de L_n . D'aquesta manera L_1 representaria el soroll pic, el més fort de la mostra, mentre que L_{99} seria el de menys intensitat. L_{50} , per la seva banda, correspon a la mitjana de la mostra i deixaria el mateix percentatge de valors per dalt que per baix. Podria interpretar-se doncs com un valor mitjà, encara que no necessàriament representatiu. Per últim, L_{90} es sol considerar com el soroll de fons, es a dir aquell que està present en l'ambient en tot moment.

Aquests indicadors estadístics, com passarà també amb altres com el $L_{Aeq}(T)$, són directament mesurables amb aparells que es poden situar en llocs públics. Per tant suposen una manera fàcil i ràpida de caracteritzar el nivell de soroll d'una determinada infraestructura del transport.

El principal desavantatge que presenten és la necessitat de prendre gran quantitat de mesures per aconseguir que l'estudi sigui suficientment representatiu. Això fa que normalment no sigui un mètode gaire precís.

4.2.2. Nivell de contaminació de soroll: L_{NP}

Basant-se en els paràmetres estadístics anteriors pot definir-se un nou indicador: el nivell de contaminació de soroll (L_{NP}), que té en compte la molèstia produïda per les variacions de nivell al voltant del valor mig. La seva expressió és la següent:

$$L_{NP} = L_{50} + L_{10} - L_{90} + \frac{(L_{10} - L_{90})^2}{60} \quad (4.3)$$

on: L_n = diferents paràmetres estadístics explicats anteriorment

Al ser una combinació d'indicadors estadístics, la seva principal feblesa radica un altre cop en la necessitat de mostres suficientment representatives. Això fa que no sigui massa utilitzat ni popular.

4.2.3. Nivell màxim i mínim de pressió sonora: $L_{Amàx}$ i $L_{Amín}$

El nivell sonor varia al llarg del temps. A vegades pot ser d'interès determinar el màxim nivell de pressió sonora ($L_{Amàx}$) i el mínim nivell de pressió sonora ($L_{Amín}$) durant un període de temps determinat. Encara que aquests indicadors no aporten cap mena d'informació sobre la duració i l'exposició total al soroll, són de gran utilitat en l'objecte d'aquest treball, l'avaluació del soroll ferroviari.

4.2.4. Nivell de pressió sonora contínua equivalent: $L_{Aeq}(T)$

El nivell de pressió sonora contínua equivalent representa el nivell de soroll constant que en el mateix interval de temps conté la mateixa energia total que el soroll fluctuant que s'ha mesurat. Aquest indicador, representat a la figura 4.4 ha d'anar referit sempre a un determinat període de temps. La formulació matemàtica és la següent:

$$L_{Aeq}(T) = 10 \cdot \log\left(\frac{1}{T}\right) \cdot \int_0^T \left(\frac{P}{P_0}\right)^2 dt \quad (4.6)$$

on: T = temps de duració de la mesura
 P = pressió sonora instantània, en Pa
 P_0 = pressió de referència abans esmentada, en Pa

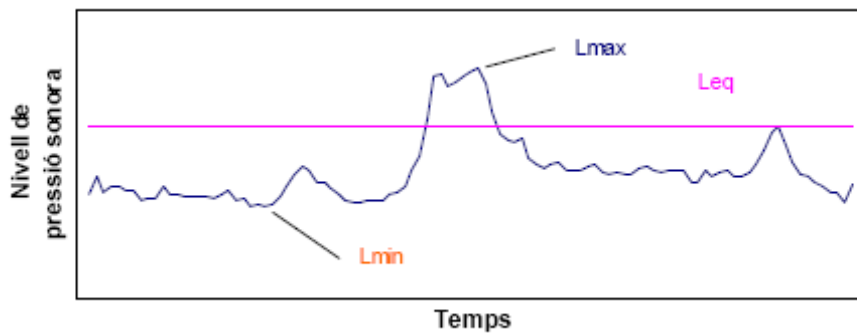


Figura 4.4 Significat físic de $L_{Aeq}(T)$ (extret de [3])

És a dir, $L_{Aeq}(T)$ és una mesura de l'exposició prolongada al soroll i permet tenir en compte les seves variacions. Això suposa un gran avantatge atès que el temps d'exposició és un dels factors claus en l'estudi de la influència del soroll sobre la salut de les persones.

Normalment, per motius pràctics, s'utilitza l'equació en la seva forma discreta on es sumen els diferents nivells de pressió sonora emesos en els intervals corresponents:

$$L_{Aeq}(T) = 10 \cdot \log\left(\frac{1}{T}\right) \cdot \sum \left(10^{\frac{L_{Ai}}{10}} \cdot t_i \right) \quad (4.7)$$

on: T = temps real d'exposició ($T = \sum t_i$)
 L_{Ai} = nivell sonor de l'interval i
 t_i = temps de l'interval corresponent a L_{Ai}

$L_{Aeq}(T)$ és un indicador habitualment emprat en l'estudi acústic de les infraestructures del transport. Això és degut al fet que permet estudiar la variació del soroll en el temps ja que, a diferència d'altres, té en compte el conjunt de sorolls que s'han de suportar durant un període de temps i a la vegada considera el nivell de soroll i la seva duració.

L'únic problema que presenta el seu ús és que, encara que permet avaluar bé la molèstia de la població en general, no expressa del tot correctament les grans variacions existents en les respostes individuals. Per tant, el $L_{Aeq}(T)$ és un bon indicador de soroll però a vegades cal completar-lo amb algun altre indicador.

Malgrat aquest petit inconvenient es pot apreciar que $L_{Aeq}(T)$ compleix bona part dels requisits que anteriorment s'han definit com a desitjables en un indicador: és relativament fàcil d'entendre, permet establir comparacions i agregar nivells procedents d'altres fonts. A més, el fet que es pugui obtenir directament dels instruments de mesura també ajuda a estendre el seu ús.

De fet, el nivell de pressió sonora continu equivalent és un dels paràmetres fonamentals tant en la normativa catalana com en el mètode C.E.R.T.U. de

soroll ferroviari que, com es veurà, és el procediment en el que es basaran els càlculs d'aquesta tesina.

Per tots aquests motius, sembla lògic aprofundir una mica més en el significat físic i funcionament d'aquest indicador. La millor manera de fer-ho és amb un exemple:

Suposem que un vehicle lleuger passa per una via, el nivell sonor màxim ($L_{Amàx}$) aconseguit al pas del vehicle durant un segon a una certa distància del mateix és de 80 dBA. Si no existeix cap altre soroll durant una hora en aquella via, el nivell sonor continu equivalent ($L_{Aeq}(1h)$) serà aproximadament 45 dBA. Si en lloc de passar una sola vegada en passa 2 durant l'hora d'estudi, el $L_{Amàx}$ aconseguit continuarà sent 80 dBA mentre que el $L_{Aeq}(1h)$ serà de 48 dBA. Si passa 10 cops, el $L_{Amàx}$ continuarà sent 80 dBA però el $L_{Aeq}(1h)$ augmentarà a 55 dBA. Com es pot apreciar en l'exemple, el $L_{Amàx}$ no té en compte ni el número de vegades que el soroll assoleix aquest nivell ni la durada del mateix. En canvi, el $L_{Aeq}(1h)$ valora aquests altres paràmetres.

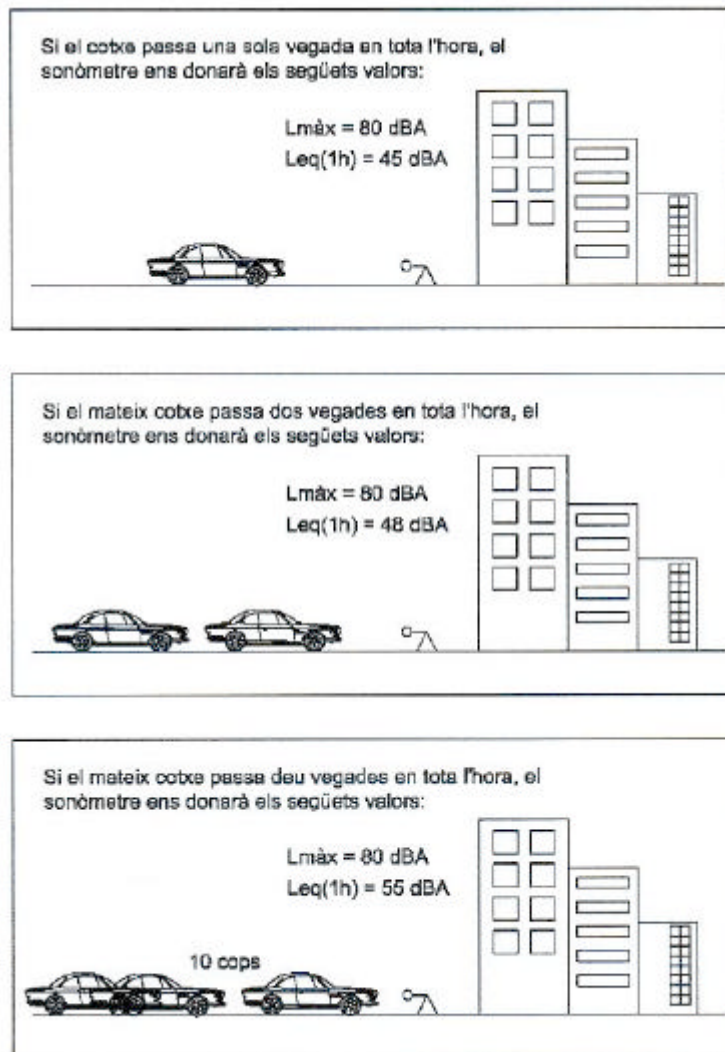


Figura 4.5 Exemple significat de $L_{Aeq}(T)$ (extret de [1])

4.2.5. Nivell corregit mitjà dia - nit: L_{dn}

El nivell corregit mitjà dia - nit és un nivell sonor equivalent de 24 hores que penalitza el nivell sonor nocturn en 10 dBA. La seva expressió és la següent:

$$L_{dn} = 10 \cdot \log \left(\frac{15}{24} \cdot 10^{\frac{L_{Aeq(d)}}{10}} + \frac{9}{24} \cdot 10^{\frac{L_{Aeq(n)+10}}{10}} \right) \quad (4.4)$$

on: $L_{Aeq}(d)$ = nivell sonor equivalent durant el dia
 $L_{Aeq}(n)$ = nivell sonor equivalent durant la nit

4.2.6. Nivell corregit mitjà dia – vespre - nit: L_{den}

El nivell corregit mitjà dia - vespre - nit es basa en el mateix principi que l'anterior però dividint el dia en tres períodes: diürn, vespertí i nocturn. Aquest indicador defineix el nivell mig a llarg termini com un nivell de pressió sonora continu equivalent. En aquest cas, com en l'anterior, es poden fer certes correccions del nivell sonor durant la nit i el vespre.

L_{den} és un dels paràmetres escollits per la Unió Europea en la seva directiva europea 2002/49/CE per determinar els sorolls de trànsit rodats, ferroviari, industrial i d'avions als països membres. A més, i com es veu en l'expressió següent, cada país o organisme pot escollir la duració de cadascun dels tres períodes en funció dels seus horaris i forma de viure.

La formulació d'aquest indicador és la següent:

$$L_{den} = 10 \cdot \log \left(\frac{1}{24} \left(t_d \cdot 10^{\frac{L_{Aeq}(d)}{10}} + t_e \cdot 10^{\frac{L_{Aeq}(e)+5}{10}} + t_n \cdot 10^{\frac{L_{Aeq}(n)+10}{10}} \right) \right) \quad (4.5)$$

on: $L_{Aeq}(d)$ = nivell sonor equivalent durant el dia
 $L_{Aeq}(e)$ = nivell sonor equivalent durant el vespre
 $L_{Aeq}(n)$ = nivell sonor equivalent durant la nit
 T_d = temps del període dia
 T_e = temps del període vespre
 t_n = temps del període nit
 $t_d + t_e + t_n$ = 24 hores

Els valors de t_d , t_e i t_n són els que cada país pot escollir en funció de les seves necessitats ja que seria massa difícil trobar uns valors comuns a tota la Unió Europea donades les grans diferències culturals i climatològiques entre els diferents països.

Aquest serà un paràmetre molt utilitzat ja que en els mapes de soroll s'han de dibuixar les línies isòfones (lloc geomètric dels punts amb igual nivell sonor) corresponents a determinats valors de L_{den} especificats en les lleis. A més, els mapes estratègics s'expressen en forma de gràfiques on es mostra quina

quantitat de gent i edificis estan exposats a cada nivell sonor al voltant de la via del tren. Aquests nivells són intervals de 5 dBA (50-54, 55-59, 60-64, 65-69, 70-74, >75) expressats també en termes d'aquest indicador.

4.2.7. Nivell d'exposició sonora: SEL

El nivell d'exposició sonora (SEL) es defineix com el nivell de pressió sonora d'un soroll continu que té la mateixa energia en un segon que la del soroll real durant l'interval de temps T. És útil per comparar successos de soroll de diferent duració. La seva expressió matemàtica és la següent:

$$SEL = 10 \cdot \log\left(\frac{1}{T_0}\right) \cdot \sum\left(10^{\frac{L_{Ai}}{10}} \cdot t_i\right) \quad (4.8)$$

on: T_0 = 1 segon
 L_{Ai} = nivell sonor de l'interval i
 t_i = temps de l'interval corresponent a L_{Ai}

4.3. SUMA DE NIVELLS SONORS

Aquesta és una operació bastant habitual en l'anàlisi de situacions reals on normalment hi ha varies fonts sonores que afecten un mateix punt d'estudi. Com es pot deduir del que s'ha comentat en l'apartat 3, aquesta suma no tindrà un caràcter lineal ja que els nivells sonors provenen d'una escala logarítmica.

Quan dues o més fonts diferents emeten soroll, totes contribueixen en el nivell de pressió sonora existent en un punt allunyat de les fonts. Per tant, per sumar els nivells sonors s'han de sumar les pressions sonores, de manera que el nivell sonor resultant compleix la següent expressió:

$$L_{TOT} = 10 \cdot \log\left(\sum_i 10^{\frac{L_i}{10}}\right) \quad (4.9)$$

on: L_i = soroll de cada font (en dBA)

De l'ús d'aquesta expressió s'observa que la font de menys potència aporta poc nivell sonor a la més potent. Així es sol considerar que si una de les fonts supera l'altre en 10 dBA, el soroll percebut és directament el resultant d'aquesta darrera font. Si pel contrari es sumen dues fonts iguals, és una bona aproximació afegir 3 dBA al valor de qualsevol d'elles.

També existeixen mètodes gràfics per a sumar nivells sonors de manera ràpida i força aproximada. En la següent figura es mostra una taula que correspon a un d'aquests procediments gràfics:

Suma de nivells sonors de dues fonts											
dBA		Font 2									
		41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
Font 1	41	44	44,5	45,1	45,8	46,5	47,2	48	48,8	49,6	50,5
	42	44,5	45	45,5	46,1	46,8	47,5	48,2	49	49,8	50,6
	43	45,1	45,5	46	46,5	47,1	47,8	48,5	49,2	50	50,8
	44	45,8	46,1	46,5	47	47,5	48,1	48,8	49,5	50,2	51
	45	46,5	46,8	47,1	47,5	48	48,5	49,1	49,8	50,5	51,2
	46	47,2	47,5	47,8	48,1	48,5	49	49,5	50,1	50,8	51,5
	47	48	48,2	48,5	48,8	49,1	49,5	50	50,5	51,1	51,8
	48	48,8	49	49,2	49,5	49,8	50,1	50,5	51	51,5	52,1
	49	49,6	49,8	50	50,2	50,5	50,8	51,1	51,5	52,0	52,5
	50	50,5	50,6	50,8	51	51,2	51,5	51,8	52,1	52,5	53

Taula 4.1 Mètode gràfic per sumar nivells sonor (extret de [4])

Per veure el funcionament de les dues maneres de treballar i comparar el seus resultats veurem un exemple:

En un punt es tenen dues fonts de soroll. Una primera font que emet 47 dBA (Font 1) i una segona de 42 dBA (Font 2). Es vol saber el nivell sonor total.

$$1. \text{ Mètode analític: } 47dBA + 42dBA = 10 \cdot \log \left(10^{\frac{47}{10}} + 10^{\frac{42}{10}} \right) = 48,1933dBA$$

$$2. \text{ Mètode gràfic: Introduint les dades a la taula: } 47dBA + 42dBA \Rightarrow 48,2dBA$$

Com es veu en els dos resultats la seva diferència és gairebé menyspreable, encara que el primer permet obtenir més decimals si es busca una gran precisió.

Fins aquí s'han descrit alguns dels indicadors de soroll i les seves operacions més bàsiques. En apartats següents s'estudiaran les normatives existents en matèria de contaminació acústica a diferents nivells institucionals. Es veurà, doncs, quins d'aquests indicadors han estat finalment escollits i en quin context han de ser utilitzats. Òbviament, també seran útils en l'elaboració i interpretació dels mapes estratègics de soroll.