

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA

ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR DE GANDIA

Master en Ingeniería Acústica

---



UNIVERSIDAD  
POLITECNICA  
DE VALENCIA



ESCUELA POLITECNICA  
SUPERIOR DE GANDIA

# Modelado Acústico del Ruido del Tren de Cercanías Grao de Gandía-Valencia

***TESIS DE MASTER***

Autor:

***Alberto Hernández Peña***

Director/es:

***D. Jesús Alba Fernández***

***D.ª Laura Bertó Carbó***

***GANDIA, 3 de Septiembre de 2013***

# Modelado Acústico del Ruido del Tren de Cercanías Grao de Gandía-Valencia

*Autor:* Alberto Hernández Peña  
*Director1:* Jesús Alba Fernández  
*Director2:* Laura Bertó Carbó

## *Resumen*

El ferrocarril es uno de los medios de transporte público más utilizados en la actualidad. Esto supone la necesidad de reducir los efectos negativos que produce, tales como ruido y vibraciones.

El presente trabajo final de máster tiene como objeto la caracterización acústica del tren de cercanías con ruta Valencia-Grao de Gandía, creando un modelo de simulación del ruido generado. Actualmente se hace uso del método de cálculo nacional de los Países Bajos, denominado RMR, para dicho fin, bajo recomendación de la Comisión de las Comunidades Europeas (Directiva 2002/4/CE). Este método requiere un comparativa entre trenes holandeses y españoles, para lo cual se usa el documento "Caracterización de la emisión acústica de los trenes utilizados en el sistema ferroviario español", presentado por ADIF. La campaña de medidas llevada a cabo se apoya en la Norma UNE-EN ISO 3095:2006, con el fin de conseguir resultados reproducibles y comparables de los niveles y espectro sonoro. Por medio del software Predictor V7.1, se realizan simulaciones basadas en el método RMR, a fin de establecer comparaciones que ratifiquen la necesidad de desarrollar un modelo propio de simulación acústica del tren.

Dicho modelo de simulación será un modelo matemático que relaciona una variable dependiente, (nivel de ruido generado por el tren), y diferentes variables independientes (constantes que definirán el modelo).

## *Abstract*

The railway is one of the public transports most used today. It supposes the need to reduce the negative effects it produces, such as noise and vibrations.

The main objective of this work is the acoustic characterization of the train with route Grau de Gandia-Valencia, creating a simulation model of the generated noise. Nowadays is being used the national calculation method of the Netherlands called RMR for that purpose, upon the recommendation of the Commission of the European Communities (Directive 2002/4/EC). This method requires a comparison between Dutch and Spanish trains, for which we used a document called "acoustic emission characterization of trains used in the Spanish rail system," presented by ADIF. The measurement campaign carried out is based on the UNE-EN ISO 3095:2006, in order to obtain reproducible and comparable results of the levels and sound spectrum. Through Predictor V7.1 software, simulations are performed based on the RMR method and later compared to ratify the requirement of developing an own model train acoustic simulation.

This simulation model will be a mathematical model that relates a dependent variable (level of noise generated by the train) and different independents variables (constants that will define the model).

Definición del trabajo : Modelado Tren RMR Acústico Ruido  
Definition of the work: RMR Train Acoustic Noise Modeling

Autor: Alberto Hernández Peña. Email: alherpe3@epsg.upv.es

Fecha de entrega: 04-09-2013

## ÍNDICE

<b>I. OBJETO Y ANTECEDENTES.....</b>	<b>4</b>
I.I. INTRODUCCIÓN .....	4
I.II. OBJETIVO .....	4
I.III. ESTRUCTURA DE LA TESINA.....	4
<b>II. LEGISLACIÓN .....</b>	<b>6</b>
II.I. EL MÉTODO RMR .....	6
II.I.I. PRINCIPIOS Y CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DEL MÉTODO DE CÁLCULO SRM II: .....	6
II.II. SRM II.....	7
II.II.I. PROCEDIMIENTO A.....	7
II.II.II. PROCEDIMIENTO B (CÁLCULO POR BANDAS DE OCTAVA) .....	8
II.II.III. PROCEDIMIENTO C.....	14
II.III. ESTUDIO DE LOS NIVELES DE RUIDO.....	14
II.IV. UNE – EN – ISO 3095:2006.....	16
II.IV.I. MAGNITUDES DE MEDICIÓN .....	17
II.IV.II. INSTRUMENTACIÓN .....	17
II.IV.III. CONDICIONES DE ENSAYO.....	17
II.IV.III.I ENTORNO DE ENSAYO: .....	17
II.IV.III.II. POSICIONES DEL MICRÓFONO.....	18
II.IV.III.III. CONDICIONES DEL VEHÍCULO Y LA VÍA .....	18
II.IV.IV. PROCEDIMIENTO DE ENSAYO .....	19
II.IV.V. CÁLCULO DEL NIVEL DE EXPOSICIÓN SONORA DE TRÁNSITO; TEL.....	19
<b>III. DESARROLLO DE LA TESINA.....</b>	<b>21</b>
III.I. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO. ....	21
III.I.I. ZONA DE ESTUDIO PARA VELOCIDAD CONSTANTE. ....	21
III.I.III. ZONA DE ESTUDIO PARA ACELERACIÓN Y DECELERACIÓN .....	22
III.II. INSTRUMENTACIÓN Y PROCEDIMIENTO.....	24
III.II.I. INSTRUMENTACIÓN. ....	24
III.II.II. PROCEDIMIENTO .....	24
III.II.II.I. TOMA DE MEDIDAS .....	24
III.II.II.II. FIRMAS ACÚSTICAS.....	25
III.II.II.III. SIMULACIÓN.....	31
III.II.III. OBTENCIÓN DEL MODELO DEL TREN. ....	32
III.II.III.I CÁLCULO DE KV .....	33
III.II.III.II. CÁLCULO DE KE.....	34
III.III. RESULTADOS.....	35
III.III.I. RESULTADOS DE $K_V$ Y $K_E$ .....	35
III.III.II. CÁLCULO DEL ERROR.....	36
III.III.III. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN .....	37
III.III.III.I. CÁLCULO DEL TEL (NIVEL DE EXPOSICIÓN SONORA DE TRÁNSITO).....	37
III.III.III.II. SIMULACIÓN EN VELOCIDAD CONSTANTE.....	38
III.III.III.II. SIMULACIÓN EN ACELERACIÓN Y DECELERACIÓN.....	40
<b>IV. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>43</b>
IV.I. CONCLUSIONES. ....	43
IV.II. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....	44
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>45</b>
<b>ANEXO I: CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL TREN DE CERCANÍAS 447.....</b>	<b>46</b>

## **I. OBJETO Y ANTECEDENTES.**

### *I.I. INTRODUCCIÓN*

Como ya es bien sabido, la iniciativa tomada frente al ruido cada vez es más exigente y cada vez se trata de dar un paso más para que podamos llegar a vivir de forma confortable, con menos molestias, con menos ruido.

En nuestro país, no se ha definido un modelo propio de simulación sonora de tráfico ferroviario aceptado por la Administración, por esta razón, y siguiendo las recomendaciones de la Comisión de las Comunidades Europeas, realizamos el control de ruido frente a líneas ferroviarias en base al método de cálculo nacional holandés, denominado ‘RMR’. Dicho método abarca un ‘catálogo’ de trenes previamente caracterizados con todas sus cualidades más relevantes (velocidad, aceleración, número de vagones, etc). Grosso modo, podría decirse que la aplicación de este método en nuestro país se basa en considerar el tren más parecido del catálogo respecto del sometido a estudio. Ahora bien, ni los trenes que tenemos son los mismos, ni los límites de velocidad, ni las características de las vías por las que circulan, etc. Por tanto, como resulta evidente, la caracterización del ruido generado por un ferrocarril en nuestra nación por el método RMR no resulta precisa.

En conclusión, la pregunta que nos lleva a hacer este inconveniente es la siguiente, ¿Cuán imprecisa es la aplicación de esta metodología?

### *I.II. OBJETIVO*

Como se ha dado a entender en el apartado anterior, el objetivo que se pretende alcanzar es determinar la divergencia existente entre los niveles de ruido generados por un tren y obtenidos haciendo uso del modelo holandés y los niveles de ruido generados por el mismo tren y obtenidos “in situ”. Posteriormente se desarrolla un modelo de cálculo matemático que define perfectamente el ruido generado por el tren a estudio. A partir de este modelo se podrá calcular el nivel sonoro que produce un tren de las mismas características al estudiado a cualquier distancia y a cualquier velocidad.

### *I.III. ESTRUCTURA DE LA TESINA*

La presente tesina se va a estructurar en tres partes, haciendo cada una de ellas referencia a diferentes bloques del proceso del estudio realizado.

En un primer bloque, expondremos la legislación vigente y el método RMR holandés. En este apartado, también se expone y se evalúa el sistema de cálculo SRM-II, en el cual se basan las simulaciones realizadas.

Además, se muestran las pautas principales del documento proporcionado por ADIF para la caracterización del tren sometido a estudio en base a su referente holandés.

En segundo lugar se describirá el trabajo de campo. Se presentará la zona a estudio haciendo mención a las características más relevantes de la misma y se hará hincapié en lo que respecta a la vía y el porqué se ha elegido dicha zona. Se mostrarán los materiales y medios empleados, así como los resultados obtenidos en función de las medidas in-situ. Con dichos datos, se procederá al cálculo de las variables independientes que caracterizarán nuestro modelo. Finalmente, se representarán las simulaciones realizadas en base al método RMR y, como es de esperar, una comparativa entre ambos.

En el tercer bloque se presentarán las conclusiones que podemos sacar del trabajo realizado, así como las futuras líneas de investigación a las que da pie.

## II. LEGISLACIÓN

### II.1. EL MÉTODO RMR

El método RMR proporciona dos sistemas de cálculo distintos:

- **SRM I:** Método simplificado. Se utiliza para situaciones con poca variación a lo largo de la línea férrea y sin reducción de ruido por las pantallas acústicas y otras obstrucciones. No se procederá a la explicación de este método, ya que la Ley 37/2003 del Ruido, y el Real Decreto 1513/2005 recomiendan como método de cálculo el SRM II.
- **SRM II:** Método detallado, por bandas de octava. Se utiliza para situaciones con mucha diferencias a lo largo de la vía del tren o con reducción de ruido mediante pantallas acústicas y otras obstrucciones. (Método de uso para la normativa nacional).

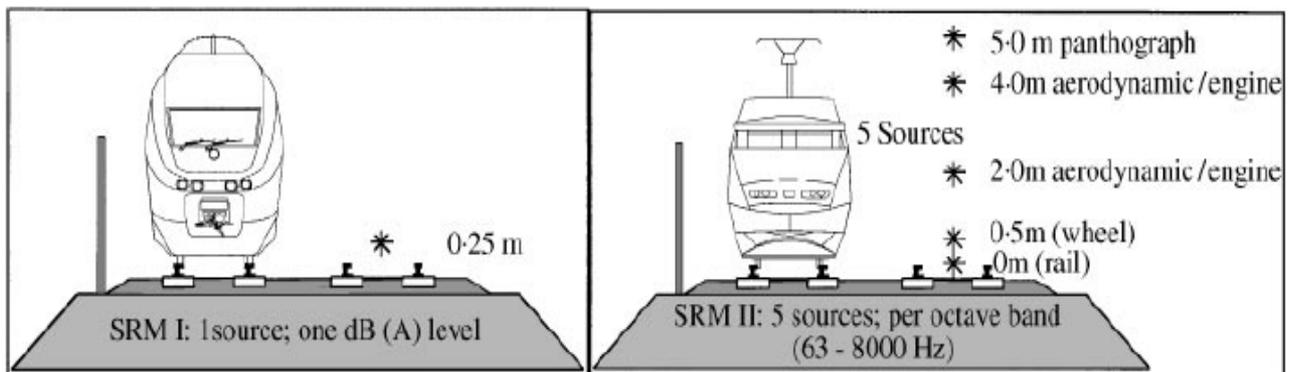


Ilustración 1. Posiciones de medida en los métodos de cálculo SRM I y SRM II.

#### II.1.1. PRINCIPIOS Y CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DEL MÉTODO DE CÁLCULO SRM II:

- Se deben definir tramos de vía con características homogéneas para los tres periodos (día, tarde y noche).
- El método contiene un base de datos con la emisión de 10 categorías de trenes según sus tipos de motores, frenos y usos (pasajeros, mercancías, alta velocidad).
- Para la caracterización de un tren no descrito en la base de datos, existe un procedimiento simplificado para asignarlo a una categoría existente.
- Se definen correcciones a la emisión por los efectos de 9 tipo de vías según sus discontinuidades, traviesas, fijaciones y balasto

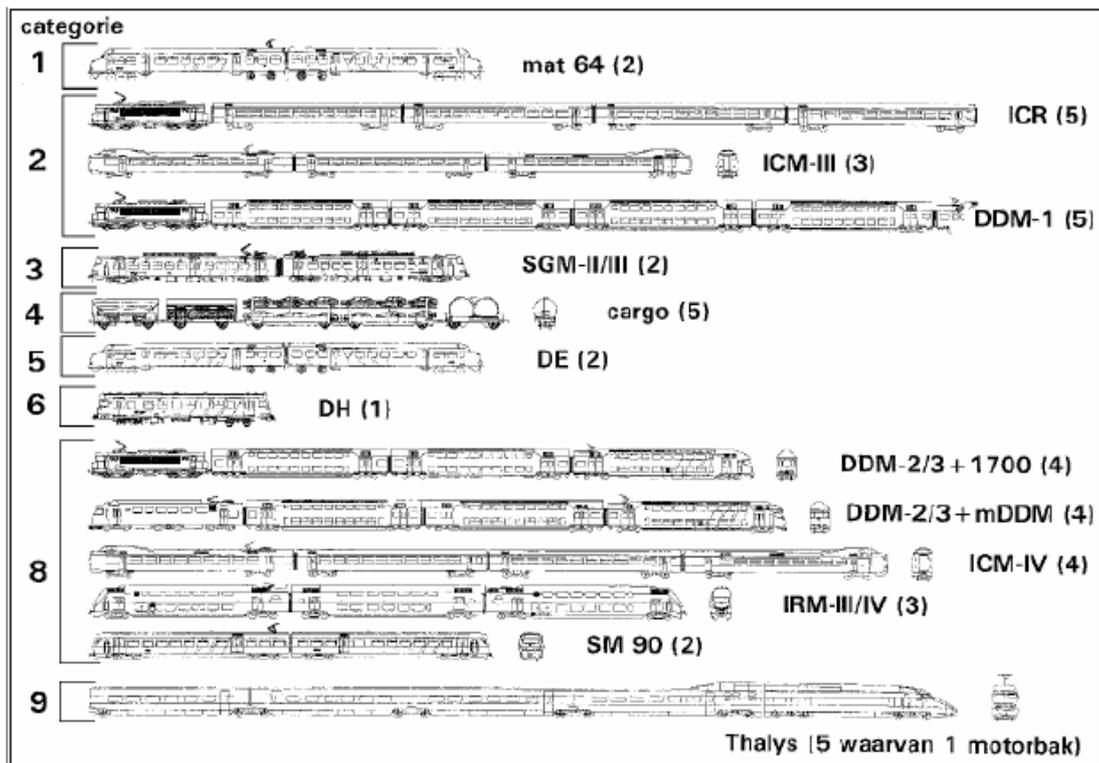
- Se aplican las correcciones en bandas de frecuencia de los efectos de la divergencia geométrica, la absorción atmosférica, el terreno, la difracción y la reflexión. Se tienen en cuenta las condiciones meteorológicas de propagación.

## II.II. SRM II

Dicho método nos describe 3 procedimientos de caracterización, los dos primeros, (A y B) caracterizan la emisión del tren. El tercero, (C) el tipo de vía.

### II.II.I. PROCEDIMIENTO A

Asignar, al tren a caracterizar, la emisión de uno de los tipos de trenes de la base de datos existente.



**Ilustración 2. Catálogo de trenes holandeses. El número de trenes esta determinado en unidades, mientras que entre paréntesis aparece el número de vehículos que componen cada unidad.**

El procedimiento consiste en realizar unas medidas de nivel de presión sonora al paso del tren en bandas de octava y compararlas con el espectro obtenido al aplicar el modelo de propagación Holandés en la misma situación de las medidas, para los diferentes trenes de la base de datos.

Se le asignará la emisión del tren que tenga un espectro más parecido y niveles más altos en todas las bandas de octava.

### *II.II.II. PROCEDIMIENTO B (CÁLCULO POR BANDAS DE OCTAVA)*

Separa la emisión en los distintos focos de ruido existentes en un tren, en cinco diferentes alturas, de forma que permite diferenciar la procedencia del ruido emitido en función del tipo de tren.

- Ruido de tracción: 0.5 m, 2m y 4m sobre el carril
- Ruido de rodadura (diferenciando el ruido emitido por el carril y el emitido por la rueda) : 0 metros y 0.5 metros sobre el carril.
- Ruido aerodinámico: 0.5, 2, 4 y 5 metros sobre el carril
- Ruido de frenado: 0.5 metros sobre el carril.

La caracterización de estos distintos focos se lleva a cabo por separado, cada uno en un rango de velocidades establecidos. El resultado es un nivel de emisión en bandas de octava en función de la velocidad y distribuido en alturas. Este resultado se determina de la siguiente forma:

Las categorías de la 1 a la 8 se modelan con dos fuentes lineales:

- 0 m (valor de emisión  $L_E^{bs}$ )
- 0,5 m (valor de emisión  $L_E^{as}$ )

La categoría 9, con 4 fuentes lineales:

- 0,5 m (valor de emisión  $L_E^{as}$ )
- 2, 4 y 5 m (valor de emisión  $L_E^{2,4,5m}$ )

donde:

- $Q_c$  y  $Q_{r,c}$  → media de las unidades de la categoría tren c que no esta y que está frenando.
- $V_c$  y  $V_{r,c}$  → velocidad media de las unidades de la categoría tren c que no esta y que está frenando.
- $bb$  → tipo de vía y condición de esta.
- $m$  → número de discontinuidades de la vía (estimado)
- $a$  → longitud de estimación.

La emisión en bandas de octava para las diferentes alturas se calcula del la siguiente manera:

- Para 0 m(bs):

$$L_{E,i}^{bs} = 10 \log \left( \sum_{c=1}^8 10^{E_{bs,nr,i,c}/10} + \sum_{c=1}^8 10^{E_{bs,r,i,c}/10} \right)$$

\*Para el tipo 9 no existe fuente a 0 m( $L_E^{bs}$ ).

- Para 0,5 m(as):

$$L_{E,i}^{as} = 10 \log \left( \sum_{c=1}^9 10^{E_{as,nr,i,c}/10} + \sum_{c=1}^9 \frac{10^{E_{as,r,i,c}}}{10} + \sum_{c=1}^9 10^{E_{brake,i,c}/10} + 10^{E_{motor,i}/10} + 10^{E_{diesel,i}/10} \right)$$

- Para 2, 4 y 5 m (sólo existen para la categoría 9):

$$L_{E,i}^{2m} = 10 \log(10^{E_{2m,l,c}/10}) \quad L_{E,i}^{4m} = 10 \log(10^{E_{4m,l,c}/10})$$

$$L_{E,i}^{5m} = 10 \log(10^{E_{5m,l,c}/10})$$

- Para las categorías 1 a 3 y 6 a 8 se hace:

$$E_{bs,nr,i,c} = E_{nr,i,c} - 1 \quad E_{as,nr,i,c} = E_{nr,i,c} - 7 \quad E_{bs,r,i,c} = E_{r,i,c} - 1$$

$$E_{as,r,i,c} = E_{r,i,c} - 7$$

- Para las categorías 4 y 5 se hace:

$$E_{bs,nr,i,c} = E_{nr,i,c} - 3 \quad E_{as,nr,i,c} = E_{nr,i,c} - 3 \quad E_{bs,r,i,c} = E_{r,i,c} - 3$$

$$E_{as,r,i,c} = E_{r,i,c} - 3$$

- Para la categoría 9 se hace:

$$E_{2m,i,c} = E_{2m,i,9} \quad E_{as,nr,i,c} = E_{nr,i,c,9}$$

$$E_{as,r,i,c} = E_{as,r,i,9} \quad E_{4m,i,c} = E_{4m,i,9}$$

$$E_{5m,i,c} = E_{5m,i,9}$$

Factores de emisión para todas las categorías:

$$E_{nr,i,v} = a_{i,c} + b_{i,c} \log V_c + 10 \log Q_c + C_{bb,i,m}$$

$$E_{r,i,v} = a_{i,c} + b_{i,c} \log V_{r,c} + 10 \log Q_{r,c} + C_{bb,i,m}$$

$$E_{brake,i,v} = a_{i,c} + b_{i,c} \log V_{r,c} + 10 \log Q_{r,c} + C_{brake,i,c}$$

- Para la categoría 5:

$$E_{diesel,i} = 10 \log( 10^{(a_{diesel,i}+b_{diesel,i} \log V_s+10 \log Q_s)/10} + 10^{(a_{diesel,i}+b_{diesel,i} \log V_{r,s}+10 \log Q_{r,s})/10} )$$

- Para las categorías 3 y 6:

$$E_{motor,i} = 10 \log( 10^{(a_{diesel,i,c}+b_{diesel,i,c} \log V_c+10 \log Q_c)/10} + 10^{(a_{diesel,i,c}+b_{diesel,i,c} \log V_{r,c}+10 \log Q_{r,c})/10} )$$

- Para la categoría 9:

$$E_{2m,i,9} = 10 \log( 10^{(a_{2m,i,9}+b_{2m,i,9} \log V_9+10 \log Q_9)/10} + 10^{(a_{2m,i,9}+b_{2m,i,9} \log V_{r,9}+10 \log Q_{r,9})/10} )$$

$$E_{4m,i,9} = 10 \log( 10^{(a_{4m,i,9}+b_{4m,i,9} \log V_9+10 \log Q_9)/10} + 10^{(a_{4m,i,9}+b_{4m,i,9} \log V_{r,9}+10 \log Q_{r,9})/10} )$$

$$E_{5m,i,9} = 10 \log( 10^{(a_{5m,i,9}+b_{5m,i,9} \log V_9+10 \log Q_9)/10} + 10^{(a_{5m,i,9}+b_{5m,i,9} \log V_{r,9}+10 \log Q_{r,9})/10} )$$

donde:

-  $a_{xx,i,c}$  y  $b_{xx,i,c}$  son los factores de emisión para cada categoría de tren c para una banda de octava 'i', a una altura 'xx'.

-  $C_{brake,i,c}$  es la corrección por frenada (tabla 1).

		Bandas de octava							
		63	125	250	500	1k	2k	4k	8k
Cat.	Coefi.	1	2	3	4	5	6	7	8
1	a b	20	55	86	86	46	33	40	29
		19	8	0	3	26	32	25	24
2	a b	51	76	91	84	46	15	24	36

Modelado Acústico del Ruido del Tren de Cercanías Grao de Gandía-Valencia

		5	0	0	7	26	41	33	20
3	a:	54	50	66	86	68	68	45	39
	v<60 v >60	36	15	66	68	51	51	27	21
	b:	0	10	10	0	10	10	20	20
	v<60 v >60	10	30	10	10	20	20	30	30
3 motor	a:	72	88	85	51	62	54	25	15
	v<60 v >60	72	35	50	68	9	71	7	-3
	b:	-							
	v<60 v >60	10	-10	0	20	10	20	30	30
4	a b	30	74	91	72	49	36	52	52
		15	0	0	12	25	31	20	13
5	a:	41	90	89	76	599	58	51	40
	v<60 v >60	41	72	89	94	76	58	51	40
	b:	10	-10	0	10	20	20	20	20
	v<60 v >60	10	0	0	0	10	20	20	20
5 diesel	a b	88	95	107	113	109	104	98	91
		-10	-10	-10	-10	-10	-10	-10	-10
6	a:	54	50	66	86	68	68	45	39
	v<60 v >60	36	15	66	68	51	51	27	21
	b:	0	10	10	0	10	10	20	20
	v<60 v >60	10	30	10	10	20	20	30	30
6 motor	a:	72	88	85	51	62	54	25	15
	v<60 v >60	72	35	50	68	9	71	7	-3
	b:	10	-10	0	20	10	20	30	30
	v<60 v >60	-10	20	20	10	40	10	40	40
7	a b	56	62	53	57	37	36	41	38
		2	7	18	18	31	30	25	23
8	a b	31	62	87	81	55	35	39	35
		15	5	0	6	19	28	23	19
<b>AUTOPROPULSADO</b>									
9-as	a	7	14	57	52	57	66	47	71
	b	27	28	12	18	18	15	21	5
9-2m	a	9	10	1	41	88	17	0	23
	b	26	28	36	22	37	34	39	24
9-4m	a	5	11	13	56	-27	-19	-37	-12
	b	27	28	31	15	50	47	53	36
9-5m	a	11	18	28	28	-50	-41	-84	-34
	b	25	26	25	25	59	56	73	45
<b>ARRASTRADO/EMPUJADO</b>									
9-as	a	3	10	57	50	53	62	43	67
	b	27	28	12	18	18	15	21	5
9-2m	a	3	10	57	46	47	55	37	61

	b	27	28	12	18	18	15	21	5
9-4m	a	1	8	54	40	40	49	30	54
	b	27	28	12	18	18	15	21	5
9-5m	a	3	10	54	0	0	0	0	0
	b	27	28	12	0	0	0	0	0

**Tabla 1. Corrección por frenada.**

ϕ

	Bandas de octava [Hz]							
Categoría	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k
1, 4 y 5	-20	-20	-20	-2	2	3	8	9
2	-20	-20	-20	0	1	2	5	5
7	-8	-7	-20	-20	-20	-20	-20	-5
3, 6, 8 y 9	-20	-20	-20	-20	-20	-20	-20	-20

**Tabla 2. Corrección por la categoría del ferrocarril.**

-  $C_{bb,i,m}$  es la corrección por el tipo de vía, siendo m la corrección por discontinuidades de la vía y rugosidad de los raíles.

- Para  $m = 1$ :  $C_{bb,i,m} = C_{bb,i}$
- Para  $m = 2, 3$  ó  $4$ :  $C_{bb,i,m} = C_{3,i} + 10 \log(1 + f_m A_i)$  con  $C_{bb,i}$  en la tabla 3 y  $f_m$  en la tabla 4.

	Bandas de octava [Hz]							
bb	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k
1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	1	1	1	5	2	1	1	1
3	1	3	3	7	4	2	3	4
4	6	8	7	10	8	5	4	0
5	6	8	8	9	2	1	1	1
6	-	-	-	-	-	-	-	-
7	6	1	0	0	0	0	0	0
8	5	4	3	6	2	1	0	0

**Tabla 3. Corrección por el tipo de vía.**

Descripción	m	$f_m$
vía con raíles unidos	2	1/30
1 cambio aislado	2	1/30
2 cambios cada 100 m	3	6/100
más de 2 cambios cada 100 m	4	8/100

**Tabla 4. Corrección por discontinuidades de la vía.**

Los niveles de emisión pueden ser determinados a partir de su velocidad máxima:

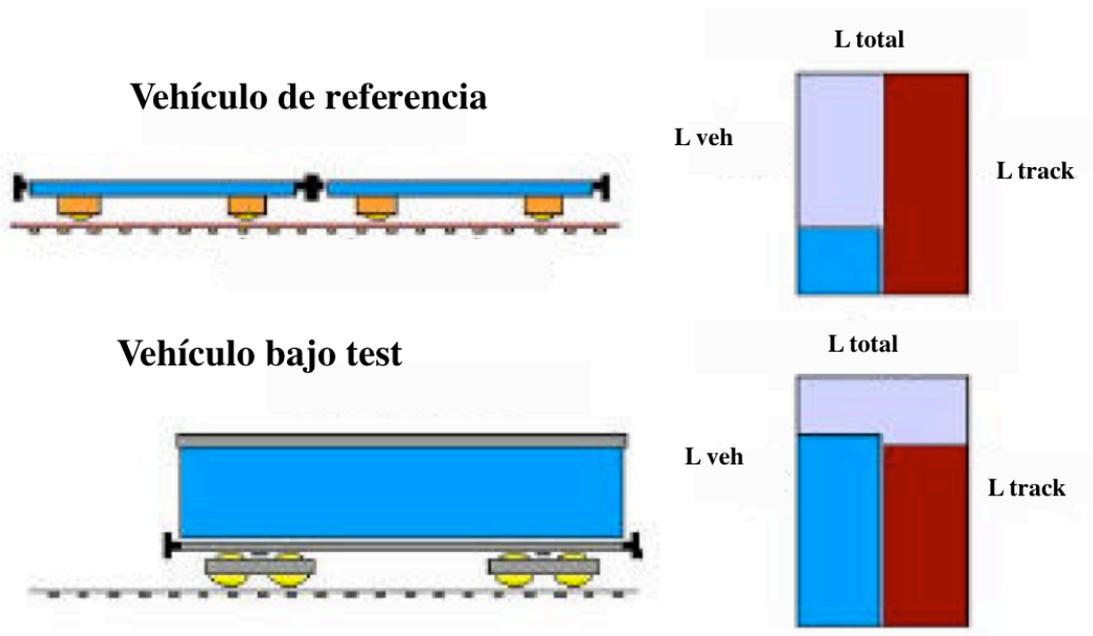
Cat	Kmh-1
1, 3 y 5	140
2 y 8	160
4 y 7	100
6	120
9	300
10	330

**Tabla 5. Velocidades máximas en función de la categoría.**

Una vez caracterizadas las emisiones de las distintas categorías de trenes, se calcula la del tramo de línea ferroviaria especificado, teniendo en cuenta el paso de las distintas categorías de trenes (y el hecho de que no existen fuentes sonoras en todas las alturas), así como el paso de los trenes en diferentes condiciones (frenando o no).

Los puntos críticos a la hora de poner en práctica este método en España son:

- La medida de rugosidad del carril y de la rueda, dado que se requiere de un equipamiento específico con el adecuado nivel de precisión del que existen pocas unidades debido a su elevado coste.
- Proceso de separación del ruido procedente del vehículo y vía, para lo que se depende de la disponibilidad y montaje de un convoy con las unidades que conformen un tren de referencia silencioso. De no disponer de él será necesario utilizar datos bibliográficos o contar con el tren más silencioso posible.



**Ilustración 3. Separación del ruido vehículo/vía.**

Donde:

- $L_{TRACK}$  = nivel de ruido producido por la vía.
- $L_{VEH}$  = nivel de ruido producido por el vehículo.
- $L_{TOTAL}$  = Nivel total de ruido

Siendo más escuetos, para nuestro propósito (método de caracterización para el ruido de tracción y frenado), únicamente es necesario tomar medidas de niveles sonoros y de velocidad de paso del tren. Por tanto, y teniendo en cuenta que existe un tren ‘equivalente’ en la base de datos del método holandés, podemos pasar por alto el procedimiento B y ceñirnos al A.

### *II.II.III. PROCEDIMIENTO C*

Por otro lado, también existe una base de datos en la que se recogen los diferentes tipos de vías, caracterizados en función de sus parámetros de medida y materiales. El procedimiento C es el que se encarga de establecer las pautas para modelar cada tipo de vía en dicha base de datos.

### *II.III. ESTUDIO DE LOS NIVELES DE RUIDO*

A la hora de efectuar el estudio de los niveles de emisión máximos, nos hemos apoyado en las indicaciones de la Norma UNE-EN ISO 3095.

En base a esta metodología de cálculo, la ecuación que define el nivel percibido por un oyente emitido por un ferrocarril es la siguiente:

$$L_{max} = L_0 - K_e \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + K_v 10 \log\left(\frac{V}{V_0}\right) - K_d$$

donde:

$K_e$  = coeficiente multiplicador de la función distancia.

$K_v$  = coeficiente multiplicador que depende de la velocidad.

$K_d$  = coeficiente de corrección de la directividad vertical.

$L_0$  = nivel de referencia a una cierta distancia.

d: Distancia entre el receptor y el eje de la vía férrea, en metros.

V: Velocidad del tren en Km/h.

$V_0$  : Velocidad del tren que emite un nivel  $L$  , a una distancia  $d$  .

Estos niveles de referencia son difíciles de caracterizar debido a que son muchos los factores que influyen. De hecho, en España no existe ninguna base de datos en las que figuren dichos valores. Según el método de cálculo usado, para los diferentes tipos de trenes, los valores vienen a ser los siguientes:

Tipo de tren	Longitud media	Valores de referencia		
		$d_0$ (m)	$V_0$ (Km/h)	$L_0$ dB(A)
Expreso	200	25	200	89
Cercanías	100	25	100	79
Metro	75	7,5	60	79
Talgo	250	25	200	90
Ave	240	25	250	92
Mercancías	325	25	100	88
Automotor	40	25	120	85

**Tabla 6. Valores de referencia en función del tipo de tren.**

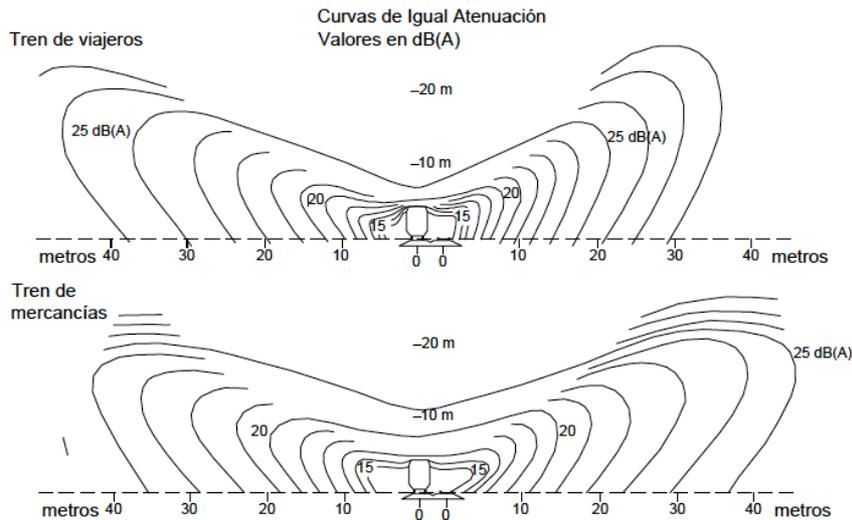
Debemos tener en cuenta que los valores de referencia de  $L_0$  son variables en  $\pm 5$ dB, debido a los diferentes estados posibles de la vía.

En cuanto a los valores de  $K_d$  en función del tipo de tren obtenemos los siguientes:

Tipo de Tren	Valores de $K_d$
Mercancías (trenes largos)	12
Rápidos, Talgos, AVE	15
Cercanías (trenes cortos)	16
Máquina Automotor	20

**Tabla 7. Valores de  $K_d$  en función del tipo de Tren.**

En cuanto a la directividad, debemos tener en cuenta que el factor  $K_d$  viene influenciado por la disminución de niveles debidos al chasis del tren. Esta relación sólo se tiene en cuenta para ángulos superiores a  $30^\circ$  respecto de la horizontal.



**Ilustración 4. Curvas de atenuación por directividad para dos tipos de trenes.**

La fórmula que responde a este comportamiento sería la siguiente:

$$K_d = A\alpha + B$$

Donde A y B son coeficientes determinados por estudios franceses cuyos valores son  $A = 0,15$  y  $B = -4,5$ .

Y  $\alpha$  es el ángulo respecto de la horizontal perpendicular a la vía.

En la siguiente tabla podemos ver los valores de  $K_d$  en función de  $\alpha$ :

$\alpha$	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
$K_d$	0	0	0	1,5	3	4,5	6	7,5	9

**Tabla 8. Variación de  $K_d$  en función de  $\alpha$ .**

Teniendo en cuenta que la directividad en las alturas a las que se ha tomado la medida no es un factor a tener en cuenta, tal y como queda explicado en el método. (figura ---).

#### II.IV. UNE – EN – ISO 3095:2006.

La normativa europea a tener en cuenta, UNE-EN ISO 3095, titulada ‘Medición del ruido emitido por vehículos que circulan sobre carriles’, nos facilita las condiciones a que debemos respetar en cuando a las magnitudes de medición, el tipo de instrumentación a usar, las condiciones de ensayo y el procedimiento de ensayo.

En función de la norma EN ISO 12001, este tipo de proyecto se considera de grado 2, de modo que la precisión en los resultados de emisión debe de ser de +/- 2 dB. Sin embargo, para los casos de aceleración y deceleración del vehículo, consideraremos los procedimientos de grado de inspección, de modo que no será necesario que cumplan los requisitos descritos en dicha norma siempre y cuando se haga una justificación

coherente de los resultados y se cumplan las condiciones necesarias para obtener unos resultados reproducibles.

### *II.IV.I. MAGNITUDES DE MEDICIÓN*

-Para trenes de varios vagones, debemos calcular el nivel de presión sonora continuo equivalente en el tiempo de paso del ferrocarril ( $L_{pAeq, Tp}$ ). Siempre ponderado A.

-Para medidas de aceleración y deceleración, la presión sonora máxima ( $L_{pAFmáx}$ ). Siempre ponderado A.

### *II.IV.II. INSTRUMENTACIÓN*

Toda la instrumentación usada debe cumplir los requisitos de un instrumento de clase 1, en base a la Norma EN 61672-1.

Se exigen micrófonos de respuesta plana en campo libre y que los filtros de tercio de octava cumplan con los requisitos de clase 1 (Norma EN 61260).

Se exige el uso de pantalla antiviento y los requisitos de calibración estipulados por las Normas EN 61672-1 y EN 61672-2.

### *II.IV.III. CONDICIONES DE ENSAYO*

En primer lugar, queda decir que la normativa permite ligeras desviaciones respecto de las condiciones de ensayo que a continuación se exponen, siempre y cuando sean descritas y justificadas en el informe.

Las condiciones de ensayo a tener en cuenta para nuestro proyecto son las siguientes:

#### *II.IV.III.I ENTORNO DE ENSAYO:*

a) entorno acústico.

→ El suelo debe de ser llano. La situación de este debe de estar comprendida entre 0 y -1 m respecto de la altura de la vía.

→ Toda clase de objetos reflectantes próximos deben de estar alejados como mínimo una distancia de 3 veces la distancia de medida.

→ La distancia entre vehículo y micrófono no debe de estar obstruida.

b) Condiciones meteorológicas

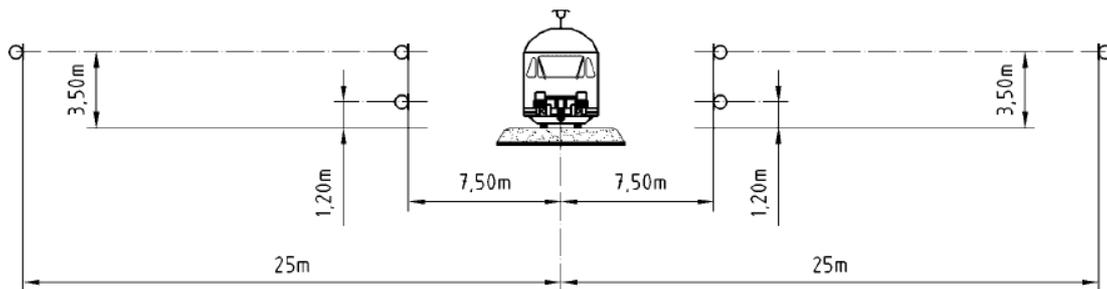
→ La velocidad del viento debe de ser menor a 5 m/s, teniendo en cuenta que no llueva ni nieve. Estas condiciones deben estar descritas en cada medida en el informe.

c) Niveles de presión sonora de ruido de fondo.

→ Para los ensayos de recepción y tipo, los niveles de ruido de fondo producidos por cualquier fuente sonora deben de estar como mínimo 10dB por debajo de la lectura de nivel de presión sonora, ponderado A, de la fuente sometida a estudio

### II.IV.III.II. POSICIONES DEL MICRÓFONO

Existen diversas posiciones normalizadas establecidas por la norma. Tanto para toma de medidas en velocidad constante como para aceleración y deceleración del vehículo. En la siguiente figura se muestra un esquema de las siguientes, las cuales no tienen porque tomarse al mismo tiempo.



**Ilustración 5. Posiciones del micrófono laterales al tren.**

Para nuestro proyecto no nos resultará necesario acogernos a estos puntos de toma de medidas, puesto que la finalidad que buscamos es establecer las diferencias de un modelo de acuerdo a lecturas in-situ y una simulación en las mismas condiciones bajo el método RMR.

### II.IV.III.III CONDICIONES DEL VEHÍCULO Y LA VÍA

El vehículo debe haber rodado un mínimo de 3000 km, además de encontrarse en condiciones normales. La vía debe de estar también en condiciones óptimas.

Para vehículos como los trenes, deben medirse con carga normal, (pasajeros, en este caso), por lo que se realizarán las medidas en horario de funcionamiento normal del vehículo.

La rugosidad de la vía la consideraremos adecuada a la norma, ya que no disponemos del material para averiguarla. Es por ello que supondremos que el mantenimiento de la vía a cargo de la empresa responsable se efectúa con normalidad.

#### *II.IV.IV. PROCEDIMIENTO DE ENSAYO*

Las consideraciones básicas a la hora de proceder son:

- Las magnitudes de medición deben corresponder a las comentadas anteriormente, así como el tiempo asociado, T.
- Para los ensayos de tipo deben tomarse al menos tres medidas por posición. Para los ensayos de seguimiento es suficiente con una.
- Si los niveles de presión sonora equivalentes son diferentes, debe utilizarse siempre el más elevado
  
- Las medidas de aceleración y deceleración, deben realizarse para una velocidad del tren (antes de decelerar y después de acelerar) de 30km/h y a una distancia de 20 metros de la cabeza del tren, finalizando la medida con la parada del tren (deceleración) o habiéndose alejado 20 metros de la posición del micrófono.

\*En el presente apartado de la normativa, se realiza una evaluación de las velocidades en función del tren. Como se ha expuesto para otros apartados, no será necesario para el fin de este proyecto.

#### *II.IV.V. CÁLCULO DEL NIVEL DE EXPOSICIÓN SONORA DE TRÁNSITO; TEL.*

Definido por la Norma UNE-EN ISO 3095 como ‘El nivel de presión sonora, ponderado A, del paso de un tren, medido durante un intervalo de tiempo T y normalizado al tiempo de paso Tp’.

Donde T es el intervalo paso del tren en el que se abarca toda la energía acústica relacionada con este y Tp es el tiempo total de paso, el cual es equivalente a la longitud de este dividida por la velocidad a la que circula.

Su cálculo se realiza mediante la siguiente fórmula:

$$TEL = LA_{eq} + 10 \log\left(\frac{T}{Tp}\right)$$

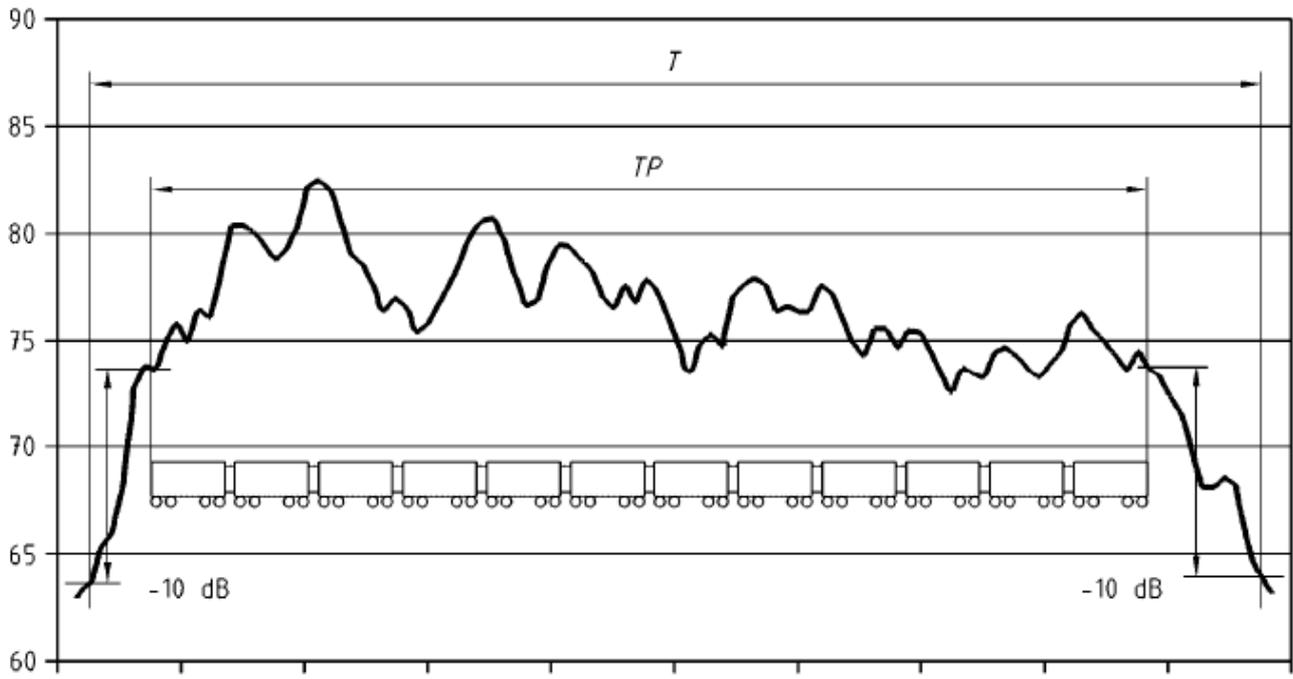


Ilustración 6. Intervalo de tiempo de medición,  $T$ , y tiempo de paso del tren;  $T_p$ .

### **III. DESARROLLO DE LA TESINA.**

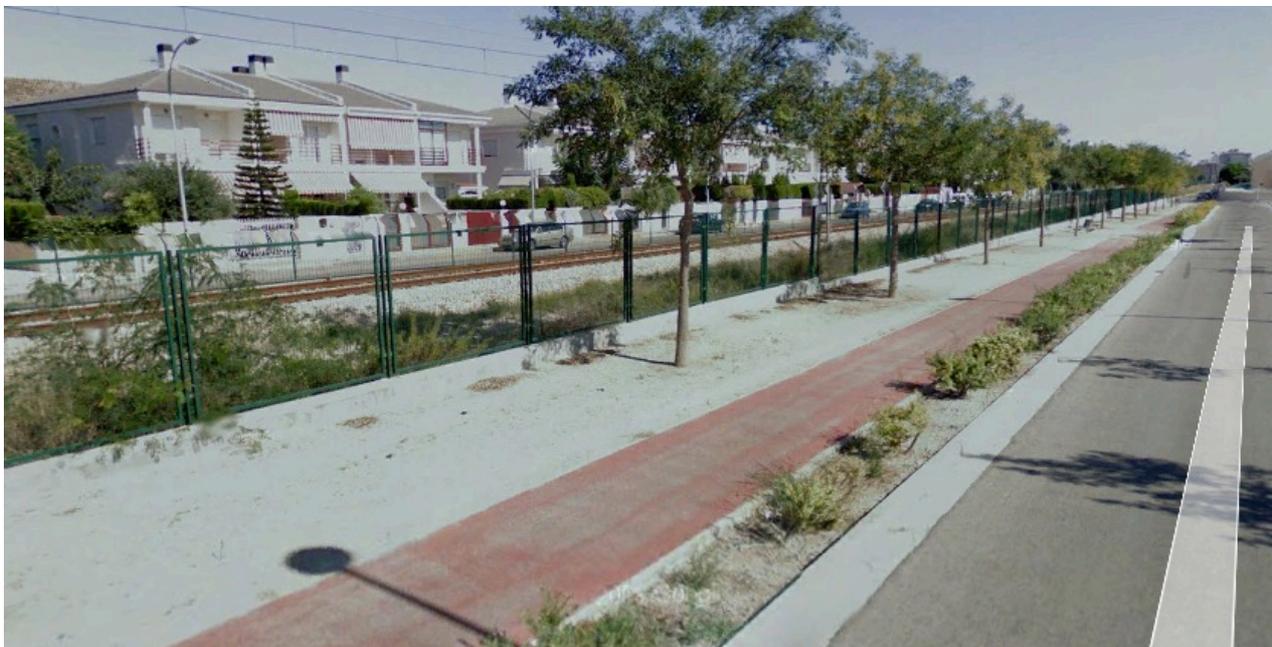
#### *III.I. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.*

Las vías del tren sometido a estudio están situadas paralelas a la Calle Joan Baptiste Comes, con la Avenida de Europa a su otro lado, pertenecientes al Grao de Gandía. Ambas calles son de tráfico regular en horas puntas, (a las cuales pasa el tren), lo cual ha dificultado conseguir datos sin la influencia de otras fuentes, aunque se ha podido conseguir adecuadamente para la zona de velocidad constante. En el caso del tramo de aceleración y deceleración surgirán ciertos impedimentos que nos impiden cumplir la normativa europea, sin embargo, no impiden tomar conclusiones a nuestro propósito.

#### *III.I.II. ZONA DE ESTUDIO PARA VELOCIDAD CONSTANTE.*

La zona escogida para la toma de medidas en velocidad constante se sitúa próxima a la última parada de tren en el trayecto Valencia Nord-Grao de Gandía, aproximadamente a 400 metros.

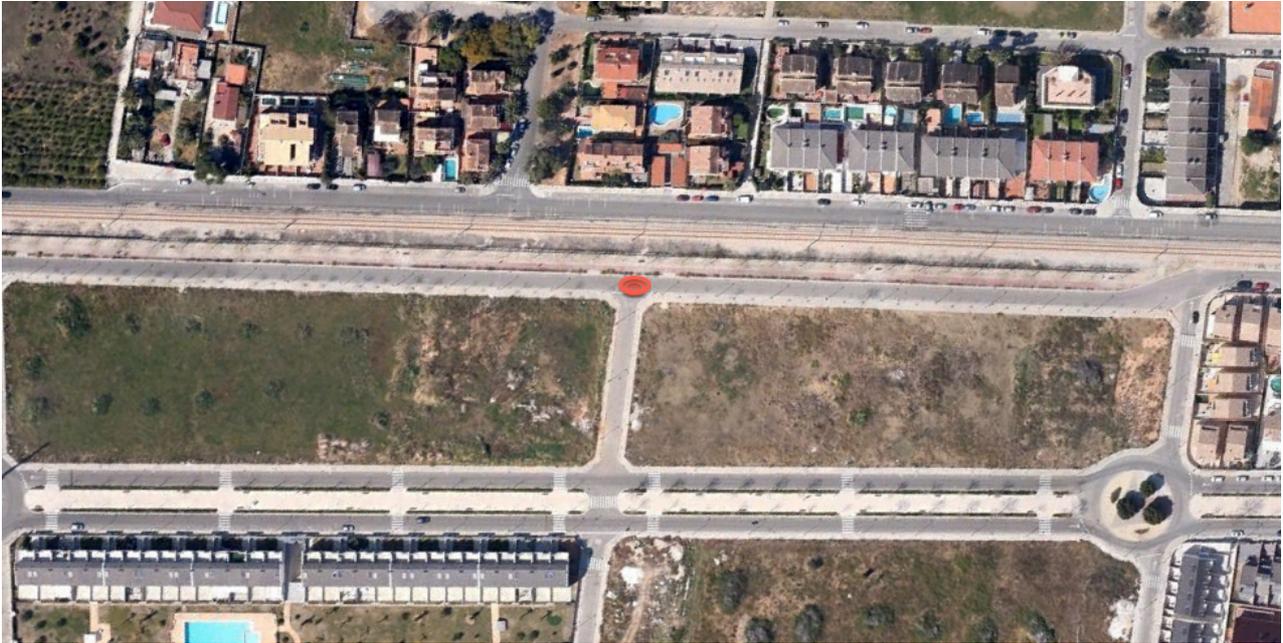
El nivel del suelo respecto de la vía es de -0,5m, siendo esta la situación del punto de toma de medidas, el cual se muestra libre de obstáculos (ilustración 6).



**Ilustración 7. Zona de medidas en velocidad constante.**

Esta parte del trayecto es perfectamente recta. A los alrededores de la vía se encuentran zonas residenciales no urbanizadas en su totalidad, lo cual ha permitido la localización del sonómetro a distancias superiores a 40

metros de las edificaciones más cercanas. Como se aprecia en la ilustración 7, el punto de medida lo rodean solares sin edificar.



**Ilustración 8. El punto de medida se encuentra señalizado por el círculo naranja.**

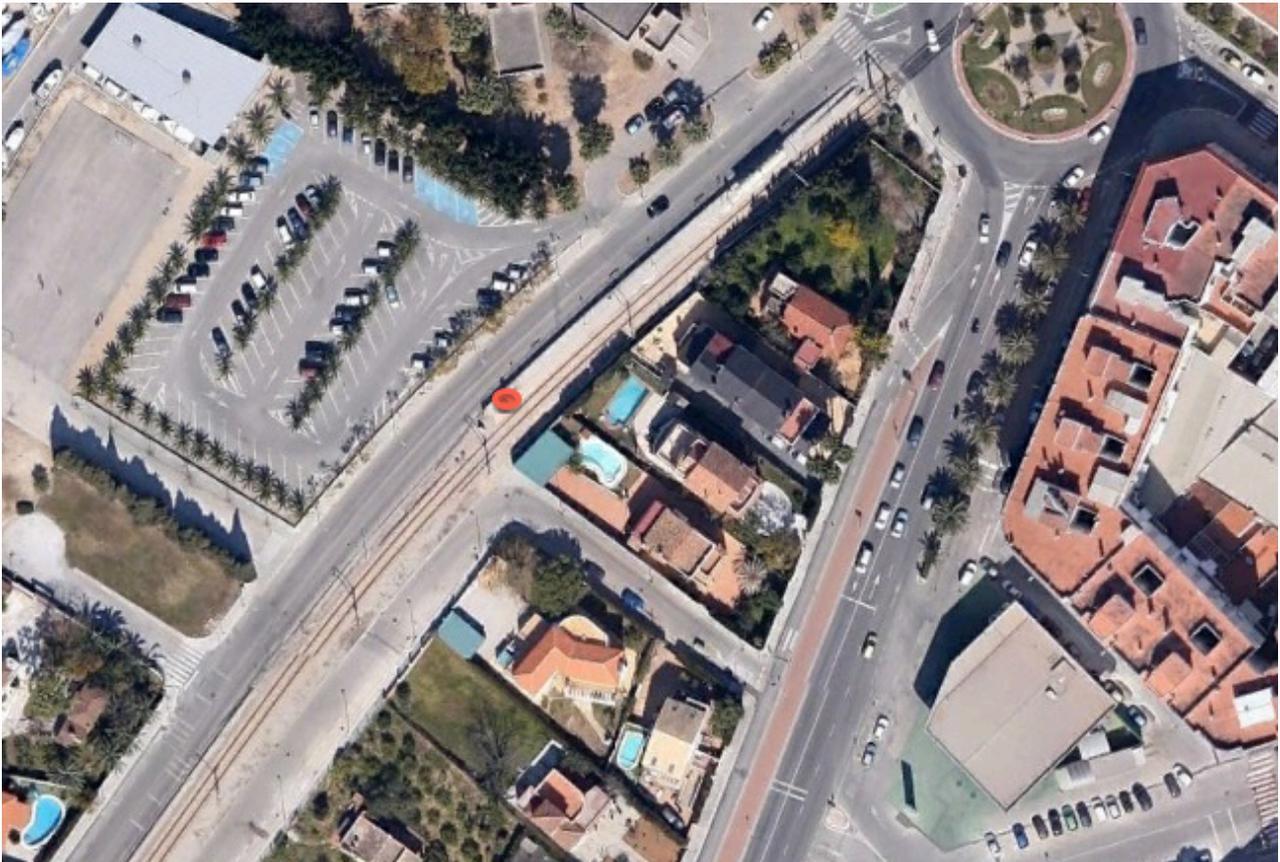
### *III.I.III. ZONA DE ESTUDIO PARA ACELERACIÓN Y DECELERACIÓN*

La zona se encuentra exactamente en principio de la Avenida Europa (empezando por el Grao de Gandía), justo al lado de la clínica del Grao. En la ilustración 8 se muestra una imagen de la parada.



**Ilustración 9. Parada final de trayecto del tren.**

Para el punto de final de trayecto, la influencia de zonas edificadas también es escasa y se sigue respetando la distancia adecuada, legalmente hablando, respecto del punto de medida. En este caso, se diferencia una elevación del suelo construida con el fin de que los pasajeros puedan apearse cómodamente, lugar en donde se han tomado las medidas para deceleración y aceleración del tren con una altura de 1,2 m por encima del suelo. En la ilustración 9 puede verse un plano desde arriba de la zona con el punto indicando el lugar de medida.



**Ilustración 10. Imagen aérea de la zona de aceleración y deceleración.**

Las medidas de deceleración se han llevado a cabo respecto a la Norma UNE-EN ISO 3095, de modo que el tren llega en dirección a la posición del micrófono y la medida se finaliza conforme el tren se para. En cambio, las de aceleración, se han realizado en el mismo punto, quedando invalidadas respecto de la norma. Este problema no se ha podido solventar debido a que el excesivo ruido producido por los frenos y la vía, aun habiéndose alejado el tren, enmascara la parte descendente de la firma acústica, así como crea una diversidad de picos que hace imposible la caracterización del modelo para este tramo. Sin embargo, si las podemos considerar de uso útil para comparar los niveles equivalentes de ruido obtenidos en ese punto con los simulados.

En la siguiente imagen, se puede apreciar un primer plano del punto de medición.



**Ilustración 11. Punto de medida para aceleración y deceleración.**

### *III.II. INSTRUMENTACIÓN Y PROCEDIMIENTO.*

#### *III.II.I. INSTRUMENTACIÓN.*

Los materiales usados para el desarrollo de la tesina han sido los siguientes:

- Sonómetro Brüel and Kjaer de tipo 1.
- Radar portátil medidor de velocidad vehicular.
- Anemómetro digital.
- Ordenador con las características necesarias.
- Software Predictor V-7.01 con el modelo RMR instalado.

#### *III.II.II. PROCEDIMIENTO*

##### *III.II.II.I. TOMA DE MEDIDAS*

El principio del proyecto comienza con la toma de medidas de nivel de ruido y velocidad, realizadas en los lugares ya indicados anteriormente.

Las medidas de niveles sonoros se han realizado a alturas de 1,4 m para el punto de velocidad constante y 0,4 m para deceleración y aceleración (respecto de los 1,2 m de altura de la parada de tren) , ya que estas alturas permiten la manipulación fácil del sonómetro, el camino directo de la onda acústica emitida no es obstaculizado y la corrección por directividad, (la cual no es estrictamente necesaria para nuestro propósito), es despreciable.

Éstas han sido tomadas en los diferentes horarios a los que pasa el tren, siendo las 8:00, 15:00 y 21:00.

El tiempo de paso del tren corresponde a unos 30 segundos desde que se empieza a percibir ruido de la fuente y entorno a 11 segundos pasando en frente del observador (meseta de la firma acústica).

### III.II.II.II. FIRMAS ACÚSTICAS

Las firmas acústicas son el primer dato que obtenemos de las medidas que nos permiten empezar a caracterizar el tren. Las susodichas nos muestran una representación gráfica de los niveles en función del tiempo.

Como se podrá apreciar, todas constan de una parte ascendente, una meseta, y una parte descendente, representando los tiempos de llegada, permanencia del tren pasando por el punto de medición, e ida.

La parte ascendente nos da información aproximada de la velocidad del tren en función de la distancia a la que se sitúa el receptor. De este modo, en un mismo punto de recepción, la parte ascendente será más abrupta para un tren que llega a gran velocidad que para uno lento. En la parte descendente, ocurriría exactamente lo mismo.

La meseta corresponde al  $L_{max}$  producido por el tren cuando pasa en frente del observador. Este nivel puede variar en función de:

- El ruido de la maquinaria se ve percibido de mejor o peor manera en función de la velocidad del tren.
- Los chasis de los vagones pueden producir mayor o menor ruido en función de la mercancía y/o número de pasajeros.
- El estado de la vía puede verse influenciado por condiciones meteorológicas de humedad, óxido debido a un mal mantenimiento, etc. Esto suele influir de manera muy notoria al ruido del ferrocarril.

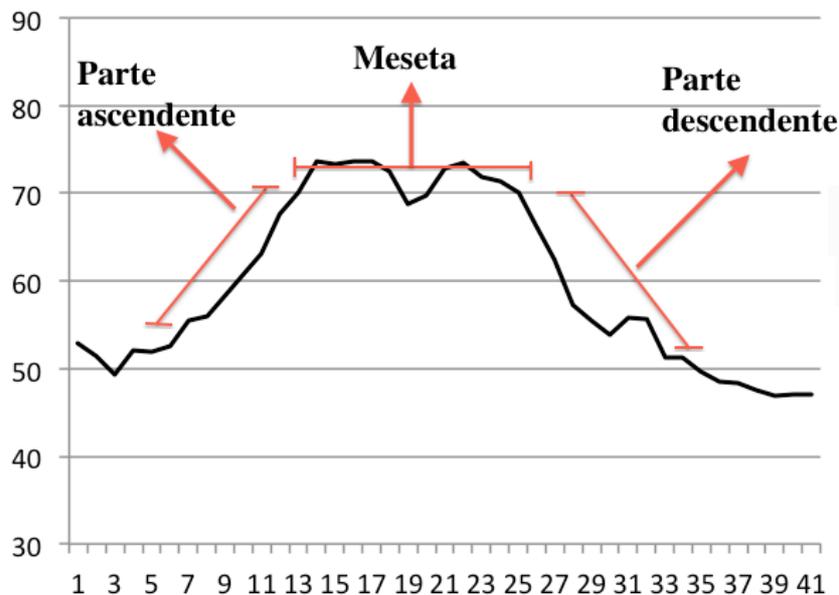
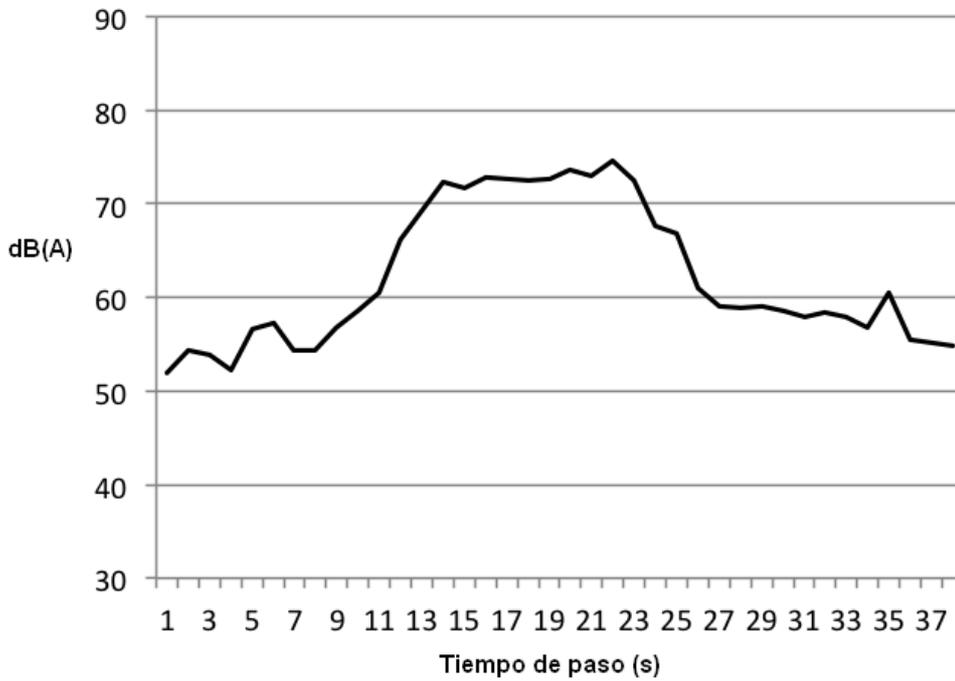


Ilustración 12. Partes de la firma acústica de un ferrocarril.

Una vez tomadas las medidas de ruido, volcamos los datos a través del software de Brüel & Kjaer y, por medio de los niveles máximos registrados, representamos las firmas acústicas para cada tramo.

- Firmas acústicas en velocidad constante.

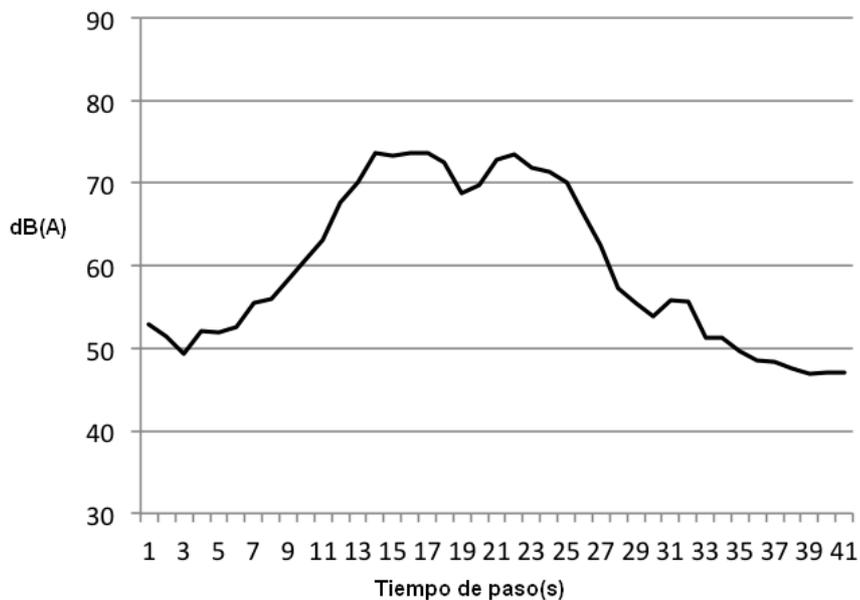
·Firma acústica del tren de cercanías serie 447 en velocidad constante, Horario, 8:00 am.



**Ilustración 13. Firma acústica en velocidad constante. 8:00.**

Como se puede observar, se aprecian máximos a aproximadamente a los 73/74 dB (A). Una vez el tren ha pasado, el nivel decae más de 10 dB (A) hasta alcanzar el ruido de fondo.

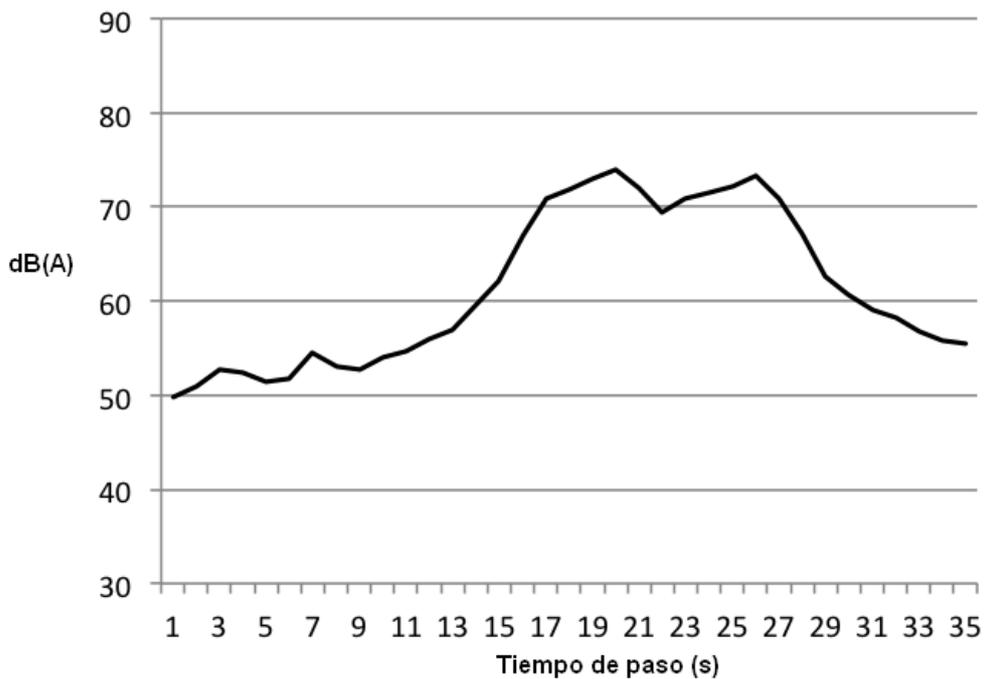
·Firma acústica del tren de cercanías serie 447, Horario, 15:00 pm.



**Ilustración 14. Firma acústica en velocidad constante. 15:00.**

Se aprecian las mismas características que en la firma anterior, esta vez se expone una firma más larga en la que se resalta el poco ruido de fondo existente. En el paso de la meseta podemos ver una pequeña decaída del nivel, posiblemente producida a una variación del nivel de presión sonora al paso entre vagones.

·Firma acústica del tren de cercanías serie 447, Horario, 21:00 pm



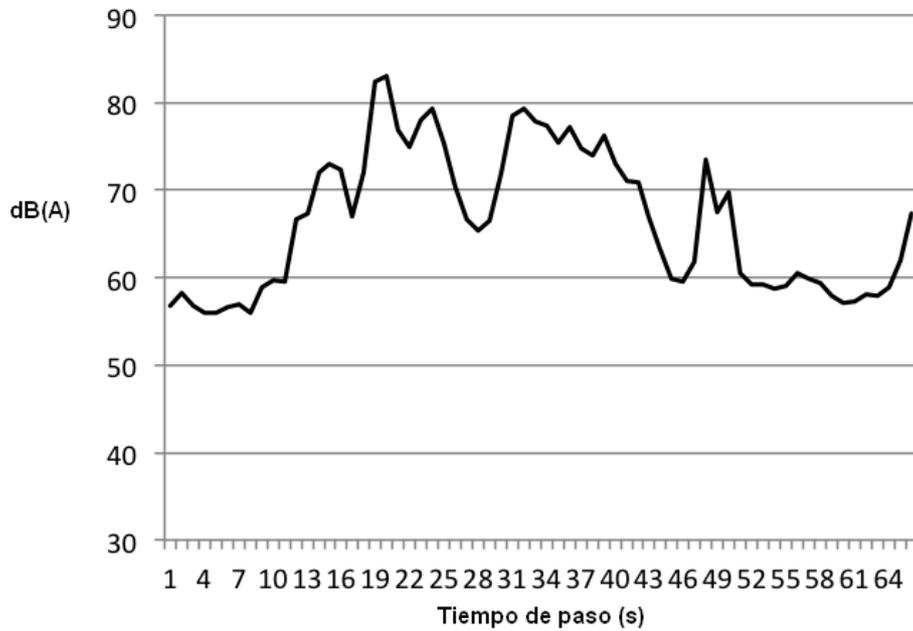
**Ilustración 15. Firma acústica en velocidad constante. 21:00.**

Las características se muestran similares a la anterior.

Podemos ver como en las firmas acústicas de velocidad constante no se han tomado niveles de presión sonora procedentes de otras fuentes que puedan alterar nuestros resultados. Siempre y cuando no se encuentre ninguna irregularidad en el rango de 10 dB por debajo de los niveles de meseta, la firma demuestra que la validez de la medida respecto de la normativa es aceptable.

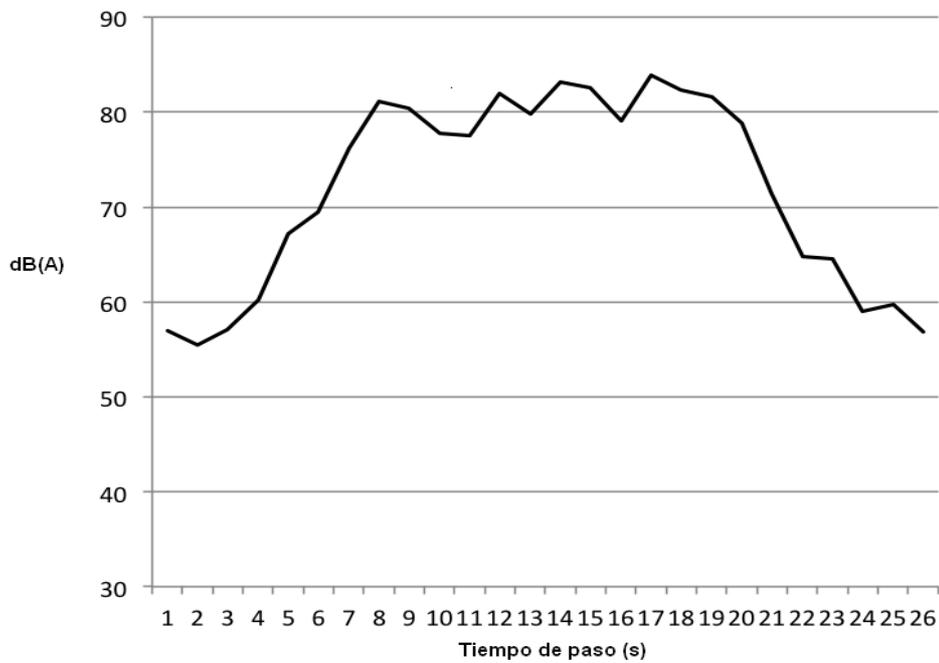
- Firmas acústicas en aceleración y deceleración

·Firma acústica del tren de cercanías serie 447 en aceleración, Horario, 8:00 am.



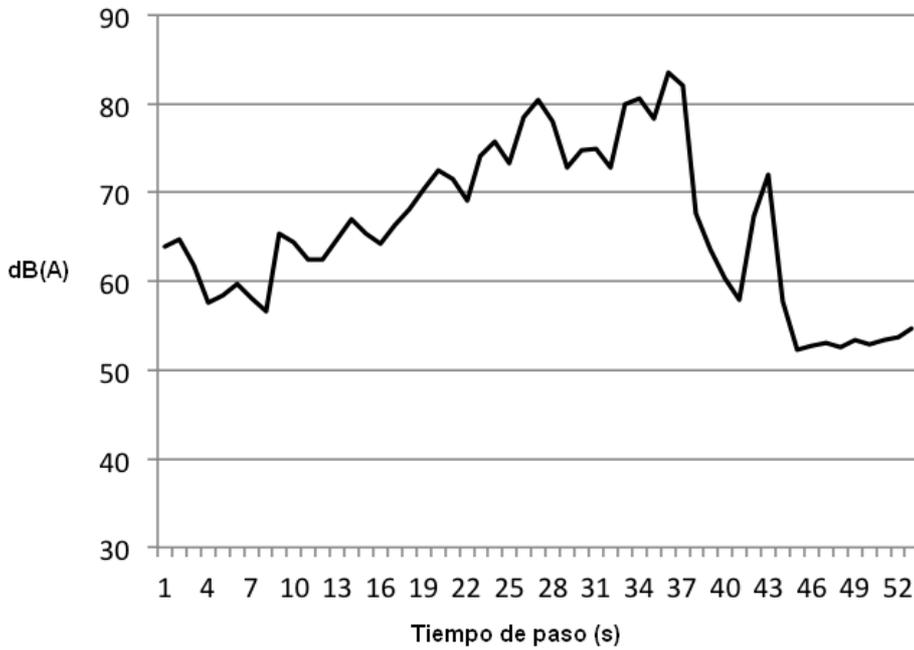
**Ilustración 16. Firma acústica del tren en aceleración. 8:00.**

·Firma acústica del tren de cercanías serie 447 en aceleración, Horario, 15:00 pm.



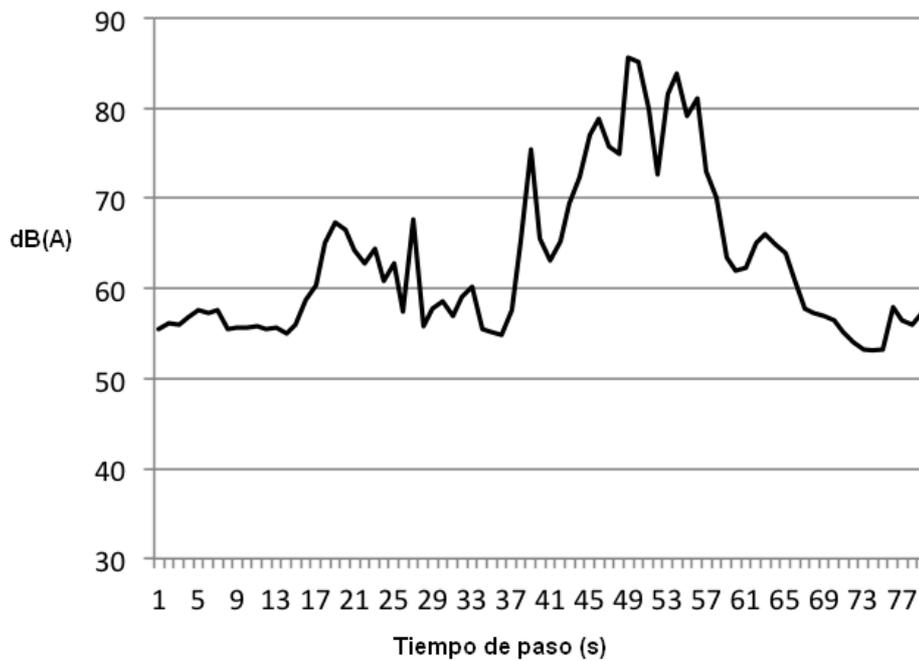
**Ilustración 17. Firma acústica del tren en aceleración. 15:00.**

·Firma acústica del tren de cercanías serie 447 en aceleración, Horario, 21:00 pm.



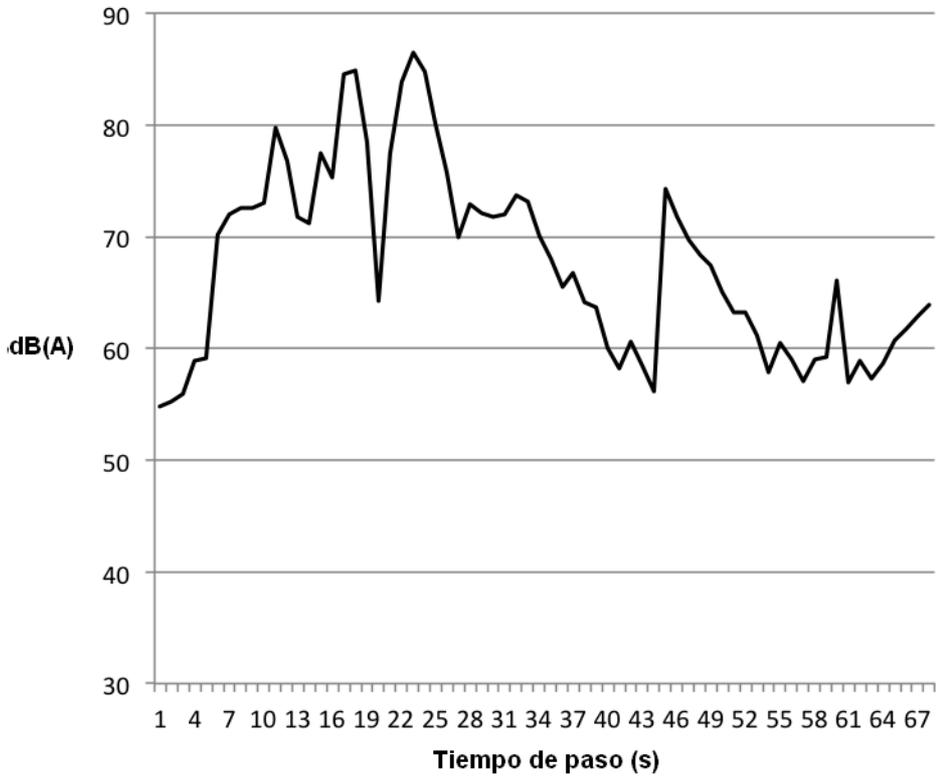
**Ilustración 18. Firma acústica del tren en aceleración. 21:00.**

·Firma acústica del tren de cercanías serie 447 en deceleración, Horario, 8:00 am.



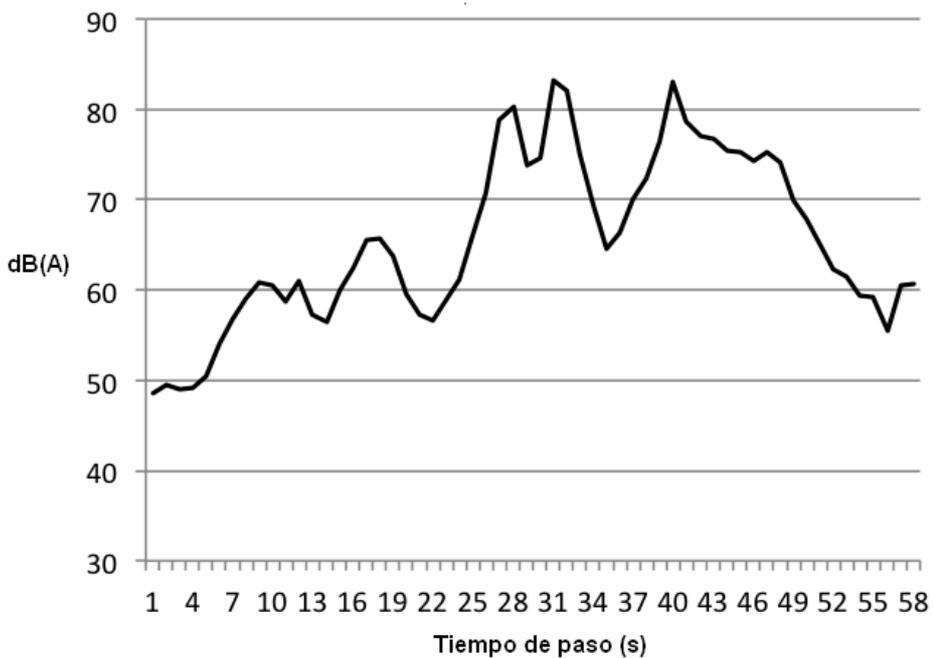
**Ilustración 19. Firma acústica del tren en deceleración. 8:00.**

·Firma acústica del tren de cercanías serie 447 en deceleración, Horario, 15:00 pm.



**Ilustración 20. Firma acústica del tren en deceleración. 15:00.**

·Firma acústica del tren de cercanías serie 447 en deceleración, Horario, 21:00 pm.



**Ilustración 21. Firma acústica del tren deceleración. 21:00.**

En las firmas acústicas del tren en aceleración y deceleración, observamos multitud de picos a niveles elevados, llegando a rozar los 85 dB. Estos picos se deben al chirrido de las ruedas con la vía en el momento de frenado. De este modo, queda claro que los niveles máximos de presión sonora los tendremos en el tramo de parada del ferrocarril.

*\*Como ya comentábamos anteriormente, la imposibilidad de realizar estas medidas a las distancias correctas y bajo condiciones adecuadas es la razón de no obtener firmas con partes ascendentes, mesetas y partes descendentes bien definidas.*

### III.II.II.III SIMULACIÓN

Finalmente, se procede a simular el equivalente del catálogo holandés en los trayectos descritos haciendo uso del software Predictor 7.1 y la correspondiente licencia que permite el uso del modelo RMR.

A la hora de introducir las características del tren equivalente al cercanías serie 447, hacemos uso del documento de ADIF llamado ‘Caracterización de la Emisión Acústica de los Trenes Usados en el Sistema Ferroviario Español’. En el encontramos un apartado de **asignación de trenes españoles a las categorías de trenes del método holandés**

En la tabla expuesta a continuación, vemos las características de los diferentes tipo de trenes españoles divididos en series y modelos.

Tipo de tren	Frenos	Tipo de motor	Vmax (Km/h)	Nº de coches	Categoría acústica	
<b>CERCANÍAS</b>						
Serie 440	100% DISCO	Eléctrico	140	3/6	8	
Serie 447	100% DISCO	Eléctrico	120	3/6	8	
Serie 446	100% DISCO	Eléctrico	100	3/6	8	
Serie 450 Serie 451	100% DISCO	Eléctrico	140	6 3	V≤60 Km/h 2	V>60 Km/h 5
Civia	100% DISCO	Eléctrico	120 (puede alcanzar 160)	5	8	

Tabla 9. Asignación de categorías acústicas para trenes de cercanías.

<b>MERCANCIAS</b>						
Mercancías	10% DISCO 90% ZAPATA	Eléctrico Diesel	100	Variable	V≤70 Km/h	V>70 Km/h

**Tabla 10. Asignación de categorías acústicas para trenes de mercancías.**

<b>REGIONALES</b>					
<b>Diesel</b>	<b>100% DISCO</b>	<b>Diesel</b>	<b>120</b>	<b>3/6</b>	<b>8</b>
<b>Eléctrico</b>	<b>100% DISCO</b>	<b>Eléctrico</b>	<b>140-160</b>	<b>3/6</b>	<b>8</b>

**Tabla 11. Asignación de categorías acústicas para trenes regionales.**

<b>MEDIA DISTANCIA</b>					
<b>Alaris</b>	<b>100% DISCO</b>	<b>Eléctrico</b>	<b>220</b>	<b>3</b>	<b>9A</b>
<b>Altaria</b>	<b>100% DISCO</b>	<b>Eléctrico Diesel</b>	<b>220</b>	<b>Variable</b>	<b>9B</b>
<b>Intercity</b>	<b>100% DISCO</b>	<b>Eléctrico</b>	<b>160</b>	<b>Variable</b>	<b>8</b>
<b>Otros talgos</b>	<b>100% DISCO</b>	<b>Eléctrico Diesel</b>	<b>180-200</b>	<b>Variable</b>	<b>8</b>

**Tabla 12. Asignación de categorías acústicas para trenes de media distancia.**

Para nuestro proyecto, el tren de cercanías con trayecto Valencia-Grao de Gandía, se encuentra dentro de la serie 447, por lo que corresponde a un tren de categoría acústica ‘8’. El modelo concreto tiene 3 vagones. En el ANEXO 1 podemos encontrar las características técnicas del mismo.

### III.II.III. OBTENCIÓN DEL MODELO DEL TREN.

A la hora de proceder a la obtención del modelo partiremos de la siguiente fórmula:

$$L_{max} = L_0 - K_e \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + K_v 10 \log\left(\frac{V}{V_0}\right) - K_d$$

donde:

$K_e$  = coeficiente multiplicador de la función distancia.

$K_v$  = coeficiente multiplicador que depende de la velocidad.

$K_d$  = coeficiente de corrección de la directividad vertical.

$L_0$  = nivel de referencia a una cierta distancia.

$d$  = Distancia entre el receptor y el eje de la vía férrea, en metros.

$d_0$  = Distancia a la que el tren emite un nivel  $L_0$  a una velocidad  $V_0$ .

V = Velocidad del tren en Km/h.

V<sub>0</sub> = Velocidad del tren que emite un nivel L<sub>0</sub> , a una distancia d<sub>0</sub> .

En este proceso obtendremos valores para K<sub>e</sub> y K<sub>v</sub>.

Al haber realizado las medidas a una altura para la cual el la atenuación por directividad es 0, consideramos K<sub>d</sub>=0.

El procedimiento a seguir lo hemos realizado con los niveles de referencia V<sub>0</sub>= 30 Km/h, y d<sub>0</sub>= 9,5 m., puesto que ha sido la velocidad media anotada y la distancia media a la fuente en cada medida.

### III.II.III.I CÁLCULO DE K<sub>V</sub>

Suponiendo que las distancias han sido siempre las mismas, podemos realizar el cálculo de K<sub>v</sub> haciendo uso de las velocidades concretas anotadas para cada medida, quedando una ecuación con dos incógnitas de la siguiente forma:

$$L_{max} = L_0 + K_v 10 \log \left( \frac{V}{V_0} \right)$$

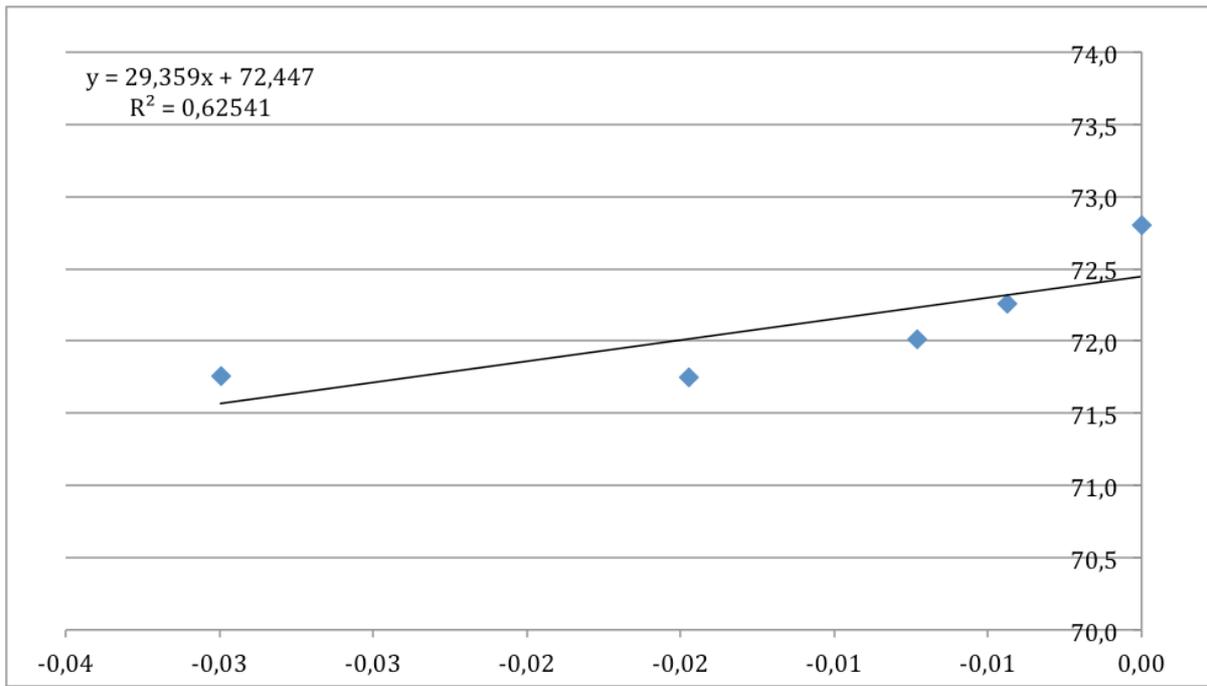
Considerando esta ecuación como una regresión lineal del tipo;

$$y = mx + n$$

obtendremos el valor de K<sub>v</sub> y L<sub>0</sub> y el coeficiente de correlación R gracias a su representación gráfica por medio de tablas Excel.

V	log(V/v0)	Lmax	Distancia (d <sub>0</sub> )	Hora de la medida
28	-0,03	71	9,5	15.00
29	-0,01	71,7	9,5	21.15
29,7	0,00	71,8	9,5	21.39
29,5	-0,01	72,2	9,5	8.00
30	0,00	72	9,5	8.15
30,2	0,00	72,8	9,5	15.15

Tabla 13. Procedimiento al cálculo de K<sub>v</sub>.



**Ilustración 22. Recta resultante de la regresión lineal para el cálculo de  $K_v$  y  $L_0$ .**

En la gráfica se puede observar una representación los niveles máximos respecto del logaritmo de la relación entre las velocidades. La línea imaginaria que se representa en base a la localización de estos valores reales tiene como características de su pendiente ‘ $mx+n$ ’, o, lo que en este caso se calcula ‘ $K_v \cdot x + L_0$ ’.

### III.II.III.II. CÁLCULO DE $K_e$

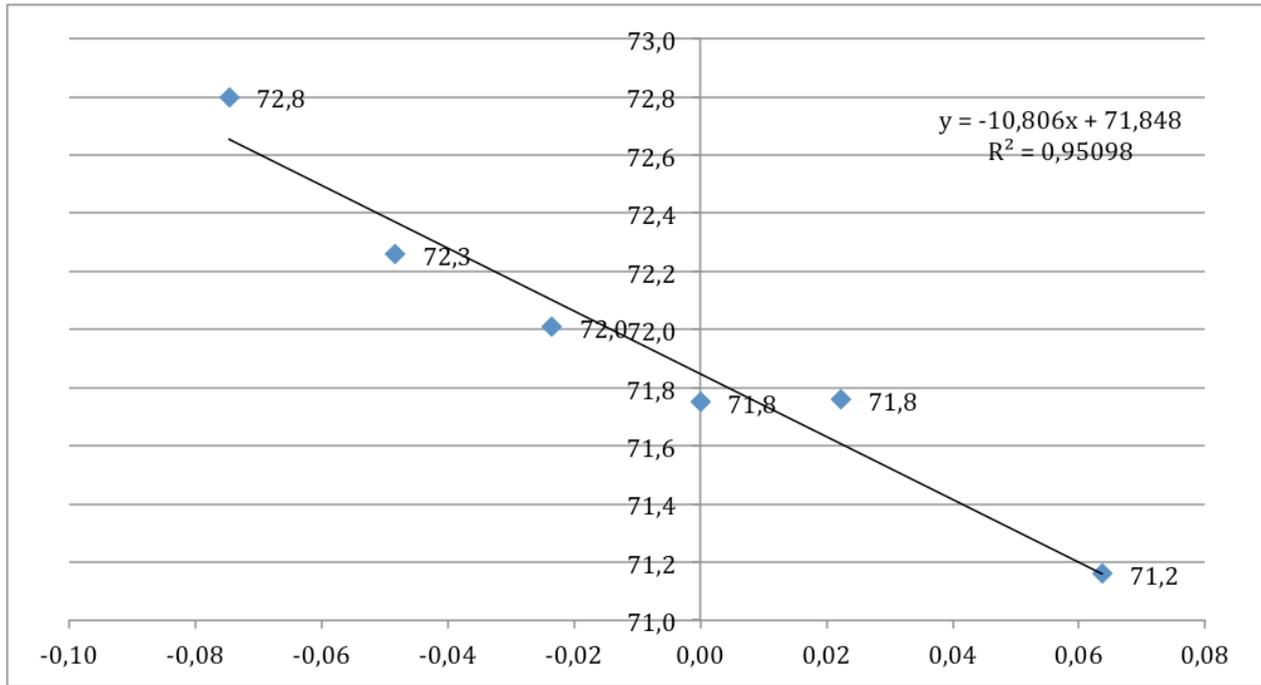
Para calcular  $K_e$ , realizamos el mismo procedimiento, pero esta vez con las distancias reales anotadas y suponiendo una velocidad real de 30 Km/h. De modo que la ecuación para el cálculo quedaría del siguiente modo:

$$L_{max} = L_0 - K_e \log\left(\frac{d}{d_0}\right)$$

De nuevo, repetimos el proceso anterior, esta vez para el cálculo de  $K_e$  y  $L_0$ .

d	log (d/do)	Lmax	$V_0$	Hora de la medida
11	0,06	71	30	15.00
10	0,02	71,7	30	21.15
9,5	0,00	71,8	30	21.39
8,5	-0,05	72,2	30	8.00
9	-0,02	72	30	8.15
8	-0,07	72,8	30	15.15

**Tabla 14. Procedimiento al cálculo de  $K_e$ .**



**Ilustración 23. Recta resultante de la regresión lineal para el cálculo de  $K_e$  y  $L_0$ .**

Como podemos ver, el método de cálculo da una pendiente negativa, lo cual representa un valor negativo de la constante  $K_e$ . Esto se debe al símbolo negativo delante de  $K_e$  en la ecuación, por lo tanto, a la hora de considerar el valor de la constante será el devuelto por los valores de la pendiente pero con  $K_e$  positivo.

### III.III. RESULTADOS

#### III.III.I. RESULTADOS DE $K_v$ Y $K_e$ .

En la tabla que se muestra a continuación, se exponen los resultados hallados para  $K_v$  y  $K_e$  por medio del método mostrado anteriormente.

<b>Lmax</b>	<b>V</b>	<b>d</b>
71	28	9,5
71,7	29	9,5
71,8	29,7	9,5
72,2	29,5	9,5
72	30	9,5
72,8	30,2	9,5
<b><math>K_v</math></b>	<b>29,35</b>	<b><math>L_0=72,4</math> dB(A)</b>

**Tabla 15. Resultados  $K_v$  y  $K_e$ .**

<b>Lmax</b>	<b>V</b>	<b>d</b>
71	30	11
71,7	30	10
71,8	30	9,5
72,2	30	8,5
72	30	9
72,8	30	8
<b>Ke</b>	<b>10,8</b>	<b>L<sub>0</sub>= 71,8 dB(A)</b>

Tabla 16. Resultados Ke.

Los coeficientes de correlación han sido de  $R^2= 0,62$  para el cálculo de la regresión lineal  $K_v$  y  $L_0$ , y de  $R^2= 0,95$  para  $K_e$  y  $L_0$ . Al ser ambos positivos podemos decir que la correlación es **directa**.

Estos datos los debemos de acompañar con un cálculo del error en las medidas.

### III.III.II. CÁLCULO DEL ERROR.

Para dicho cálculo, vamos a suponer un nivel medio  $L_0$  de 72 dB(A). La manera de proceder a ello, será del siguiente modo:

$$Error(n) = \sqrt{[L_{max, med1} - L_{max, form1}]^2 + [L_{max, med2} - L_{max, form2}]^2 + \dots/n}$$

Donde:

- $L_{max, med 'n'}$  = Nivel de presión sonora máximo medido en la medida 'n'.
- $L_{max, form 'n'}$  = Nivel presión sonora máximo calculado para los  $K_v$  y  $K_e$  hallados a las diferentes velocidades y distancias.
- Error = rango que estipula la posibilidad de fallo medido en dB (A)

<b>Lmax (medido)</b>	<b>Lmax (calculado)</b>	$\sqrt{[L_{max,med'n'}-L_{max,form'n'}]^2}$	<b>Error (dB (A))</b>
71	65,8	5,2	<b>2,09</b>
71,7	67,5	4,2	
71,8	70,8	1,0	
72,2	70,5	1,7	
72	72,4	0,4	
72,8	72,9	0,1	

**Tabla 17. Cálculo del error.**

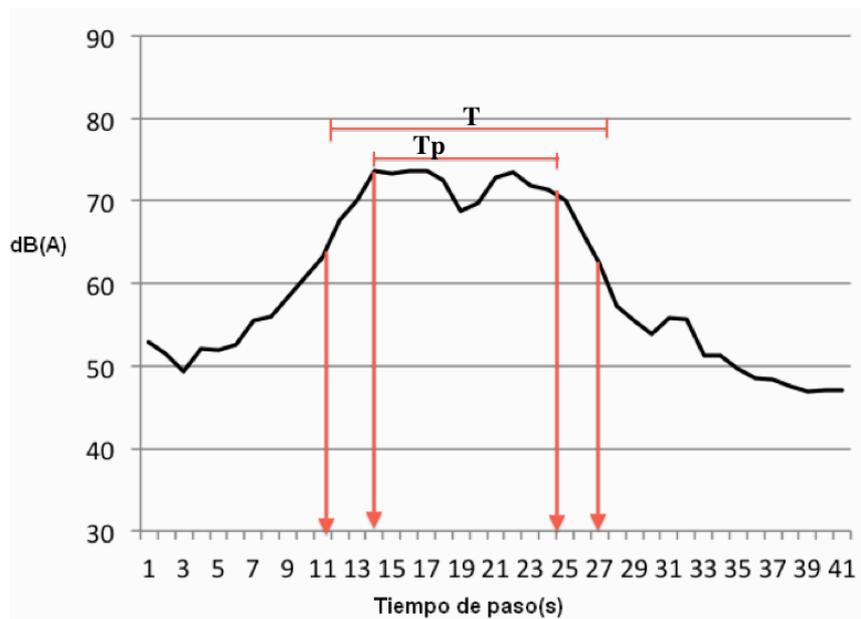
Redondeando la cifra, obtenemos un error de +/- 2 dB(A), de modo que cumplimos el grado 2 de exactitud elegido para mediciones de emisión de ruido según la Norma EN ISO 12001.

### III.III.III. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

#### III.III.III.I. CÁLCULO DEL TEL (NIVEL DE EXPOSICIÓN SONORA DE TRÁNSITO).

Tal y como podemos ver en el apartado de ‘firmas acústicas’, podemos obtener el T (intervalo de tiempo de medición) y Tp (tiempo de paso del tren) sin problemas para las medidas en velocidad constante, puesto que para aceleración y deceleración ha resultado imposible debido a la forma de las firmas obtenidas.

En la siguiente imagen de una de las firmas acústicas, se ven señalizados los tiempos T y Tp, los cuales no varían en las diferentes firmas acústicas a velocidad constante, puesto que la velocidad y longitud del tren las vamos a considerar constantes.



**Ilustración 24. Tiempos T y Tp en la firma acústica del tren.**

Obteniendo valores T=16 s y Tp= 11 s, aplicamos la siguiente fórmula, junto con los datos de LAeq obtenidos con el sonómetro, y obtenemos el nivel de exposición sonora de tránsito.

$$TEL = LA_{eq} + 10 \log \left( \frac{T}{T_p} \right)$$

Hora	LAeq	T (s)	Tp (s)	TEL (dB (A))
15:00	61,9	16	11	63,5
15:00	<b>64,4</b>	16	11	66
21:00	59,6	16	11	61,2
21:00	61,3	16	11	62,9
08:00	<b>66,7</b>	16	11	68,3
08:00	62,6	16	11	64,2

Tabla 18. Cálculo del TEL.

### III.III.III.II. SIMULACIÓN EN VELOCIDAD CONSTANTE.

En primer lugar, se expone la leyenda de colores extraída del software Predictor 7.1, consecuencia de los mapas de ruido (Ilustraciones 26, 27 y 28).

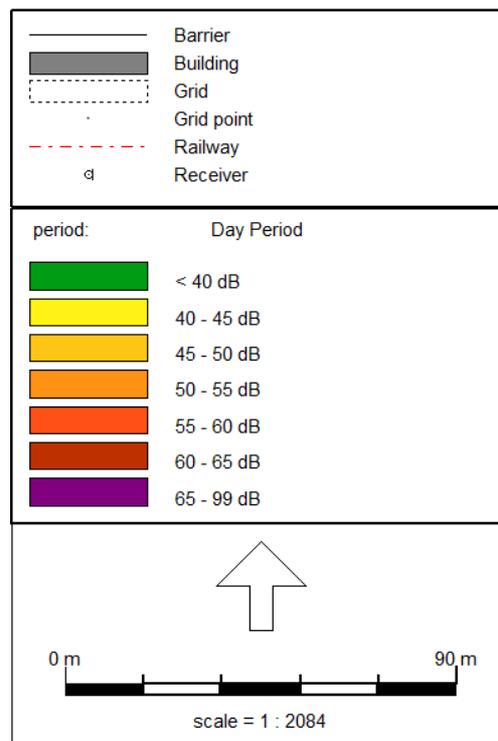
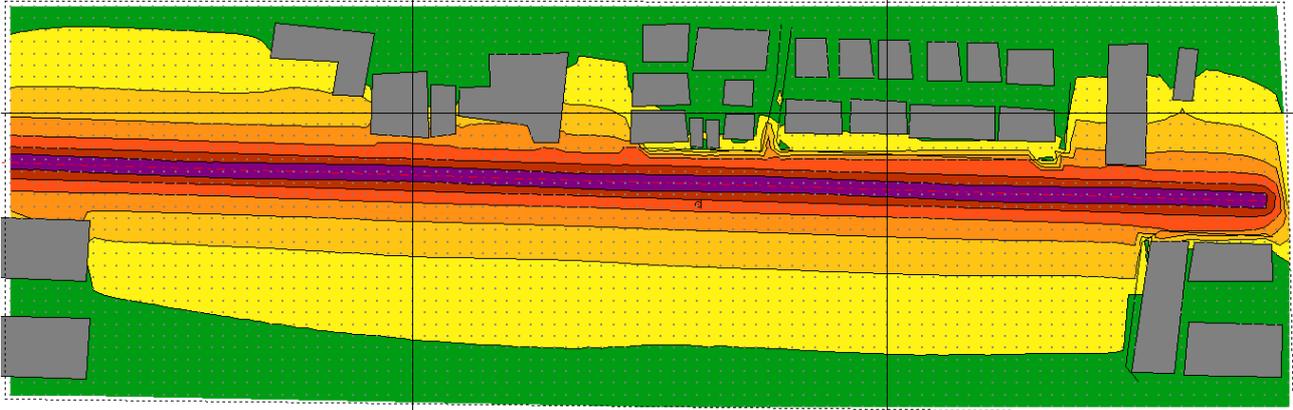


Ilustración 25. Leyenda de colores de los mapas de ruido.

Como bien se puede apreciar, sólo abarcamos el periodo de día, puesto que según la normativa Valenciana las horas en las que pasa el tren corresponden al horario diurno, (ya que el horario de tarde no existe). Evidentemente, esto se ha contemplado a la hora de escribir los datos en Predictor 7.0, donde se diferencian día, tarde y noche.



**Ilustración 26. Mapa de ruido para el paso a velocidad constante**

La simulación para velocidad constante realizada con el software ha resultado de parentesco similar a las medidas de LAeq tomadas, exceptuando dos casos señalados en la tabla 19. Para los niveles obtenidos en el cálculo del TEL, evidentemente la diferencia se hace mayor.

Hora	TEL (dB (A))	LAeq	Predictor 7.0 (LAeq)
15:00	63,5	61,9	60,8
15:00	66	64,4	
21:00	61,2	59,6	
21:00	62,9	61,3	
08:00	68,3	66,7	
08:00	64,2	62,6	

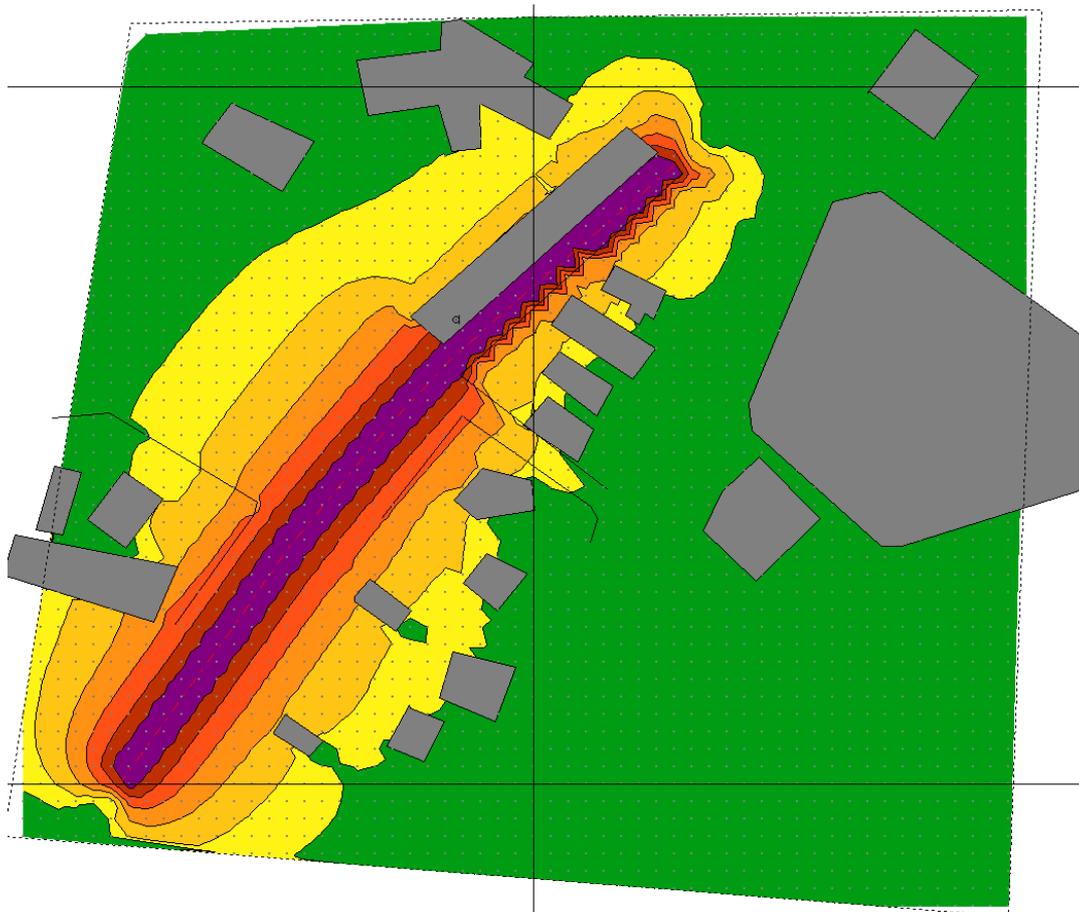
**Tabla 19. Comparación del LAeq medido con el LAeq simulado.**

Como podemos ver, para dos de las mediciones, tomadas a las 15:00 y 8:00, obtenemos diferencias de niveles de aproximadamente 3 y 5 dB. Teniendo en cuenta los factores que pueden influir en la medida podemos descartarlos por condiciones o ruidos de fondo de mayor nivel.

### III.III.III.II. SIMULACIÓN EN ACELERACIÓN Y DECELERACIÓN.

Para la zona de aceleración y deceleración hemos realizado dos simulaciones diferentes, ya que el software no permite realizar simulaciones en aceleración y deceleración desde un punto hasta la posición de 0 km/h. En primer lugar se muestra el tramo a 20 km/h, lo cual correspondería a la primera parte del tramo, justo antes de la ligera curva que hace la vía antes de la zona de parada.

·Zona de aceleración y deceleración (20km/h):



**Ilustración 27. Mapa de ruido para el paso en aceleración y deceleración (20 Km/h).**

En segundo lugar realizamos una simulación a 10 km/h, velocidad aproximada a la que se encuentra el tren cuando empieza a entrar en la zona del apeadero.

·Zona de aceleración y deceleración (10km/h):

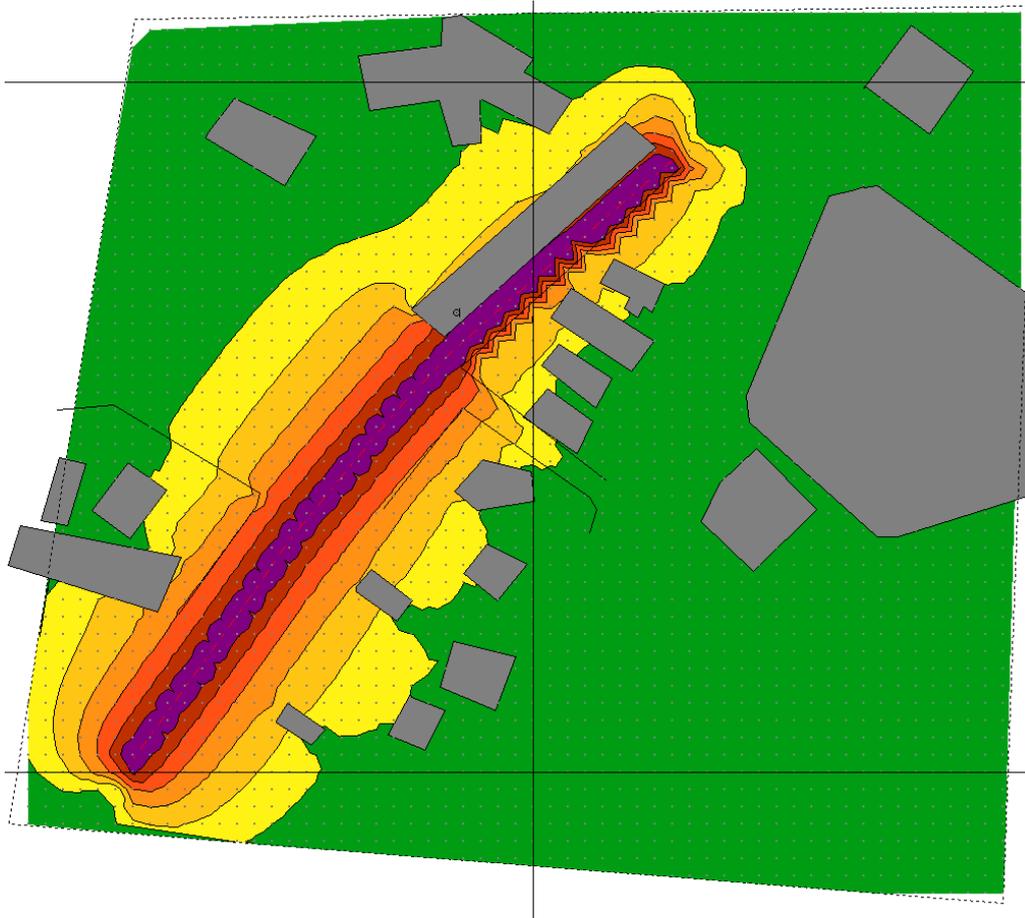


Ilustración 28. Mapa de ruido para el paso en aceleración y deceleración, (10 Km/h).

Podemos ver como los niveles disminuyen de forma equitativa a la representación en velocidad constante a 30 km/h. Sin embargo, el software nos muestra una representación con niveles de ruido equivalentes que no corresponden con los medidos, y esto se debe a la presencia de ruidos de frenado cuyos niveles son bastante significativos, tal y como se pudo observar en la representación de las firmas acústicas. Esta clase de ruidos no están presentes en el modelo RMR, y en casos como este producen un aumento del nivel de sonoro equivalente relevante. De este modo, como podemos ver en la tabla 20, las diferencias son muy considerables.

Tipo de medida	Horario	LAeq (dB(A))	Predictor V7.1 (20Km/h) (dB(A))
aceleración	08:00	70,6	<b>56,5</b>
deceleración	08:00	69	Predictor V7.1 (10Km/h) (dB(A))
aceleración	21:00	70,	<b>53,2</b>
deceleración	21:00	70,9	
aceleración	15:00	73,4	
deceleración	15:00	70,8	

Tabla 20. Comparación niveles LAeq para aceleración y deceleración.

Por otro lado, tal y como se comenta en la normativa, este tipo de medidas deben hacerse en condiciones idóneas de la vía, así como a una distancia de 20 metros del tren. La imposibilidad de averiguar los niveles del TEL nos deja un vacío cognitivo que evidentemente habría que tratar de solventar en futuras investigaciones.

## **IV. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.**

### *IV.1. CONCLUSIONES.*

Tras la realización del presente proyecto, hemos podido llegar a diversas conclusiones en diferentes aspectos de este.

En primer lugar, en cuanto a la toma de medidas, debemos tener en cuenta que un experimento de este tipo está sometido a un gran número de variables que deben ser valoradas antes de la realización de las mismas. Éstas son:

- El número de medidas a realizar para obtener un rango de error escaso en relación a lo estipulado por la Norma EN ISO 12001 debe de ser elevado. Al menos con medios para los que se ha dispuesto en este TFM.
- Se trata de una zona turística y los trenes en el horario de verano llevan una carga de pasajeros considerablemente mayor.
- Las condiciones meteorológicas, incluso dentro de lo permitido, pueden influir en el ruido emitido por el movimiento de árboles, arbustos u otros objetos que pueden aumentar el nivel de ruido equivalente medido.
- La toma de medidas puede requerir la necesidad de las autoridades para detener el tráfico rodado cercano, así como el uso de materiales de alto coste que nos permitan hallar diversos parámetros como la rugosidad de la vía o cerciorarnos del buen estado de la maquinaria más ruidosa del ferrocarril. De este modo, podríamos asegurar si el método RMR ha sido impreciso o no en los tramos de aceleración y deceleración del tren sometido a estudio.

En segundo lugar, en cuanto resultados y simulaciones:

- Se hace necesario el desarrollo de un modelo propio para dicha categoría de trenes.
- Se requiere la posibilidad de simular los tramos de aceleración y deceleración, y no solo el mapa acústico para condiciones de velocidad constante.
- Es necesario la obtención de firmas acústicas bien definidas en sus tres tramos, para lo cual debe de cerciorarse el buen estado de la vía, como anteriormente se comentaba.
- La realización de un nuevo modelo conllevaría el desarrollo de un método de corrección por frenada y por velocidades, ocurriendo lo mismo con el tipo de vía y sus discontinuidades.

*IV.II. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.*

Las futuras posibilidades a investigar presentadas tras la realización de este proyecto podrían considerarse las siguientes:

- Toma de medidas necesaria para hallar el factor asociado a la directividad ( $K_d$ ).
- Estudio de la influencia real del número de vagones de los ferrocarriles.
- Influencia del ruido de los frenos.
- Desarrollo de una nueva corrección del ruido por frenada.
- Cálculo del factor de rugosidad de la vía.

## **BIBLIOGRAFÍA**

- [1] ‘Caracterización de la emisión acústica de los trenes utilizados en el sistema ferroviario español’. ADIF, Subdirección del Medio Ambiente.
- [2] ‘RMVR 1996’. The Netherlands national computational method.
- [3] ‘RMVR 2004’. The Netherlands national computational method.
- [4] ‘Experimental investigation of railway rolling stock noise levels’. Balckars, P.; Baranovskii, A.; Iljina, L.; Popov, V. 2009.
- [5] ‘Description and measurement of environmental noise -- Part 2: Acquisition of data pertinent to land use’. ISO 1996-2:1987
- [6] ‘Revisión del método holandés de caracterización acústica de trenes para su aplicación en la directiva 2002/49/CE sobre evaluación y gestión del ruido ambiental’. Nagore Tellado; José Luis Eguiguren; Itziar Aspuru. Tecniacústica, Bilbao, 2003.
- [7] ‘Un primer estudio del ruido en los actuales trenes de la red ferroviaria española’. L. Faus. Universidad Politécnica de Valencia.
- [8] ‘Medición del ruido emitido por vehículos que circulan sobre carriles’. Norma Europea EN ISO 3095:2005.

## ANEXO I: CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL TREN DE CERCANÍAS 447.

- **Composición** : M-R-M.
- **Ancho de vía**: 1.668 mm.
- **Tensión de alimentación**: 3.000 Vcc.
- **Composición múltiple**: Hasta 3 unidades de tren.
- **Potencia en régimen continuo**: 2.400 Kw.
- **Motores**: 8 asíncronos trifásicos de 320 kW.
- **Tipo de motor**: Asíncrono trifásico.
- **Esfuerzo tractor máximo en llantas**: 195 kN.
- **Esfuerzo tractor máximo en el arranque**: 230 kN.
- **Esfuerzo tractor a la velocidad máxima**: 58 kN.
- **Velocidad máxima**: 120 km/h.
- **Aceleración en arranque**: 1 m/s<sup>2</sup>.
- **Aceleración entre 0 y 60 Km/h**: 0,75 m/s<sup>2</sup>.
- **Aceleración entre 0 y 100 Km/h**: 0,60 m/s<sup>2</sup>.
- **Aceleración entre 0 y 120 Km/h**: 0,50 m/s<sup>2</sup>.
- **Deceleración normal**: 1.0 m/s<sup>2</sup>.
- **Deceleración consólo freno eléctrico**: 1.0 m/s<sup>2</sup>.
- **Deceleración máxima de urgencia**: 1.2 m/s<sup>2</sup>.
- **Arranque en rampa**: 35 mm/m.
- **Alimentación de auxiliares**: 2 convertidores estáticos.
- **Entrada energía al convertidor**: 3.000 V cc.
- **Salida energía a auxiliares**: 380 V ca y 72 V cc.
- **Pantógrafos por tren**: 2 en coche remolque intermedio.
- **Freno dinámico**: Regenerativo y Reostático.
- **Freno neumático continuo**: Aire comprimido.
- **Control de freno neumático**: Eléctrico + neumático.
- **Freno de estacionamiento**: Manual de husillo .

- **Aparato de enganche:** Schafenberg.
- **Aseos por tren:** 1.
- **Puertas de viajero con costado:** 3 x 3.
- **Conducción con velocidad prefijada:** Sí.
- **Cabinas de conducción:** 2.
- **Mando múltiple:** Sí.
- **Señalización en cabina:** Asfa.
- **Calefacción:** Eléctrica.
- **Aire acondicionado:** 1 equipo por coche.
- **Iluminación interior:** Fluorescente y halógena.
- **Megafonía:** Sí.
- **Indicadores luminosos de información:** Sí.
- **Plazas sentadas coche M/R Composición A:** 78/78.
- **Plazas sentadas coche M/R Composición B:** 90/90.
- **Total plazas sentadas:** 234/270.
- **Plazas de pie coche Composición A:** 152/164.
- **Plazas de pie coche Composición B:** 123/145.
- **Total plazas de pie:** 468/391.
- **Plazas totales UT Composición A:** 702/661.
- **Unidades construidas:** 183.
- **Año de recepción:** 1993-2001.

- PESOS Y DIMENSIONES

Dimensiones (en mm).

	<b>Coche Motor</b>	<b>Coche Remolque</b>	<b>Total</b>
Longitud entre enganches	25.479	25.035	75.993
Ancho exterior	2.900	2.900	2.900
Altura máxima sobre el carril	4.185	4.185	4.185
Distancia entre bogies	17.400	17.775	-
Empate de bogie	2.500	2.500	-
Diámetro de rueda nueva	890	890	-
Altura del piso sobre el carril	1.150	1.150	-

Peso (en T).

	<b>Coche Motor</b>	<b>Coche Remolque</b>	<b>Total</b>
Cajas	37,5	32,3	107,3
Bogies	21,0	13,2	55,2
Tara	58,5	45,5	162,5
Carga máxima (1º, 3º y 4º lote/2º lote)	17,3/16,61	18,4	53,6/51,6
Peso máximo (1º, 3º y 4º lote/2º lote)	75,8/75,1	64,5/63,8	216,1/214,1