Anexo 11.
Modelación y Evaluación de Vibraciones

ÍNDICE

A. PRESENTACIÓN 1
B. OBJETIVOS 2
B.1. Objetivo General 2
B.2. Objetivos Específicos 2
C. METODOLOGÍA 2
C.1. Área de Influencia 2
C.2 Identificación de Receptores Representativos 5
C.3 Normativa Referencia FTA 2018 8
C.4 Modelación Emisiones Vibratorias 10
C.5 Caracterización de fuentes vibratorias del proyecto 11
D. RESULTADOS 18
D.1. Etapa de Construcción 18
D.2. Cumplimiento normativo Etapa de Construcción 21
D.3 Etapa de Operación 22
D.4. Cumplimiento normativo Etapa de Operación 24
D.5. Etapa de Cierre 24
D.6. Cumplimiento normativo Etapa de Cierre en periodo diurno 26
E. CONCLUSIONES 27
E.1 Etapa de Construcción 27
E.2 Etapa de Operación 27
E.3 Etapa de Cierre 27
F. BIBLIOGRAFÍA 28
G. APÉNDICE I. 29
H. APÉNDICE II. 30

FIGURAS

Figura 1. Área de Influencia del proyecto en condición más adversa (Construcción y cierre). 4
Figura 2. Ubicación Receptores Representativos. 5

TABLAS

Tabla 1. Identificación, descripción, ubicación de receptores humanos y fuentes vibratorias más cercanas al proyecto en la etapa de construcción. 6
Tabla 2. Límites aplicables a cada receptor según criterio de confort y daño estructural en cada receptor 9
Tabla 3. Velocidad peak de partícula y niveles de vibración de distintas maquinarias, medidos a 25 pies de distancia, de referencia para modelación. 11
Tabla 4. Descripción, caracterización y régimen emisión de fuentes vibratorias actividad Instalación de Faenas 12
Tabla 5. Descripción, caracterización y régimen emisión de fuentes vibratorias actividad Planta de Hormigón 12

Tabla 6. Descripción, caracterización y régimen emisión de fuentes vibratorias actividad Habilitación de Caminos 13
Tabla 7. Descripción, caracterización y régimen emisión de fuentes vibratorias actividad Montaje Aerogeneradores y Fundaciones. 13
Tabla 8. Descripción, caracterización y régimen emisión de fuentes vibratorias actividad Construcción Subestación Eléctrica 14
Tabla 9. Descripción, caracterización y régimen emisión de fuentes vibratorias actividad Estructuras Líneas Alta Tensión 14
Tabla 10. Descripción, caracterización y régimen emisión de fuentes vibratorias actividad Desmontaje, traslado y montaje de grúas 15
Tabla 11. Descripción, caracterización y periodo de generación de fuentes vibratorias Etapa de Operación 16
Tabla 12. Descripción, caracterización de fuentes vibratorias en etapa de cierre 17
Tabla 13. Niveles de Velocidad Vibratoria Proyectados y Evaluación Cumplimiento Criterio Confort en Etapa Construcción. 18
Tabla 14. Niveles de Velocidad Vibratoria Proyectados y Evaluación Cumplimiento Criterio Daño Estructural en Etapa de Construcción. 20
Tabla 15. Niveles de Velocidad Vibratoria proyectados v/s niveles determinados en Línea Base y Umbral de Percepción en Etapa de Operación en horario diurno. 22
Tabla 16. Niveles de Velocidad Vibratoria proyectados v/s niveles determinados en Línea Base y Umbral de Percepción en Etapa de Operación en horario nocturno. .. 23
Tabla 17. Niveles de Velocidad Vibratoria Proyectados y Evaluación Cumplimiento Criterio Confort en Etapa de Cierre en horario diurno. 25
Tabla 18. Niveles de Velocidad Vibratoria Proyectados y Evaluación Cumplimiento Criterio Daño Estructural en Etapa de Cierre en horario diurno. 25

A. PRESENTACIÓN

En el presente informe se detalla la Modelación y Evaluación de la componente ambiental vibraciones como antecedente para el Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto "Parque Eólico Rinconada", emplazado en las comunas de Laja y Los Ángeles, provincia del Biobío y región homónima.

Lo anterior debido a que las diversas faenas del proyecto podrían modificar el entorno, existiendo probabilidad de incrementar los niveles de velocidad vibratoria sobre receptores vecinos en las inmediaciones que requieren de un determinado estándar de confort.

El área de influencia se definió en función de la existencia de receptores que pudiesen ser afectadas por un aumento en el nivel de velocidad vibratoria, determinándose veinte (20) receptores representativos.

La modelación y posterior evaluación de las vibraciones, a falta de normativa nacional, se efectuó a través de modelos de cálculo desarrollados para tal efecto, comparando los valores obtenidos con máximos permitidos establecidos en el manual "Transit Noise and Vibration Impact Assessment", elaborada por la Federal Transit Administration (FTA), 2018, normativa recomendada por el Ministerio de Medio Ambiente a través de la "Guía para la Predicción y Evaluación de Impactos por Ruido y Vibración en el SEIA (2019)".

Cabe señalar que en **Capítulo 3.1.8 Línea Base de Vibración Ambiental**, se establecieron los receptores representativos, los límites de confort para las personas y daño estructural para las viviendas de estos.

Se debe considerar al receptor representativo como un receptor o punto de control, dado que representa a un o grupo de receptores que se encuentra dentro o lo más próximo al Área de Influencia. De este modo, si las proyecciones de Niveles de Velocidad Vibratoria en estos receptores representativos cumplen con los criterios de confort para las personas y daño estructural para las viviendas, por ende se cumplirá para los receptores más alejados del proyecto.

B. OBJETIVOS

B.1. Objetivo General

- Evaluar el impacto por vibraciones que podría generar el proyecto "Parque Eólico Rinconada", según criterios establecidos en la normativa de referencia nacional o internacional aplicable.

B.2. Objetivos Específicos

- Determinar el Área de Influencia del Proyecto.
- Estimar el Nivel de Velocidad de Vibración en función de la maquinaria y actividades a desarrollar durante las diversas etapas del proyecto.
- Verificar el cumplimiento de los máximos permitidos que establece la normativa aplicable.
- Proponer medidas de control de vibraciones a nivel de ingeniería conceptual, en caso de que fuese necesario.

C. METODOLOGÍA

C.1. Área de Influencia

El Área de Influencia (AI) se define en el D.S. N° 40/12 del Ministerio del Medio Ambiente (MMA) que Aprueba Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (D.S N° 40/12 del MMA), como el área o espacio geográfico cuyos atributos, elementos naturales o socioculturales deben ser considerados con la finalidad de definir si el proyecto o actividad genera o presenta algunos de los efectos, características o circunstancias del Artículo 11° de la Ley 19.300, o bien para justificar la inexistencia de dichos efectos, características o circunstancias.

Para determinar la extensión del área de influencia, se consideran los criterios indicados en Guía sobre el Área de Influencia en el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental, Servicio de Evaluación Ambiental (2017) y la Guía para la Predicción y Evaluación de Impactos por Ruido y Vibración en el SEIA (2019), establece que se debe determinar la peor condición, la cual considera:

- Para proyectos que incluyen faenas de construcción, como por ejemplo compactación dinámica, la norma BS 5228-2:2009, recomienda una distancia de exploración mínima de 200 m o bien considerando distancias (radios) en la cual los niveles de velocidad vibratoria proyectados se igualan al Nivel de Vibración Basal Típico (50 VdB) considerando la fuente de mayor emisión vibratoria.

- Se debe incluir a todos los receptores sensibles a la vibración, ya sea directamente o a través de un receptor equivalente con respecto de la vibración, que se encuentren dentro del área establecida como área de influencia.

Siguiendo lo indicado en "Guía para la Predicción y Evaluación de Impactos por Ruido y Vibración del SEIA", para determinar el Área de Influencia (AI) se debe calcular la distancia en la cual los niveles proyectados se igualan al menor de los niveles que caracterizan la situación basal. Para tal efecto, se consideró la maquinaria de mayor emisión vibratoria que corresponde a un Rodillo Compactador con un Nivel de Velocidad Vibratoria de 94 VdB a 25 pies a utilizar en la fase de construcción del proyecto y como menor Nivel Basal 52 VdB, valor determinado en el **Capítulo 3.1.8 Línea Base de Vibración Ambiental** del proyecto.

Para calcular la distancia del AI se utilizará la ecuación 1, empleada por el método de estimación de velocidad vibratoria de la "Transit Noise and Vibration Impact Assessment".

Al despejar la variable D de la ecuación se tiene que el radio del AI queda determinado por:

$$\boldsymbol{D = 7.62 * 10^{((Lvref - Lvb)/30)}} \qquad \textbf{Ecuación 1}$$

Donde:

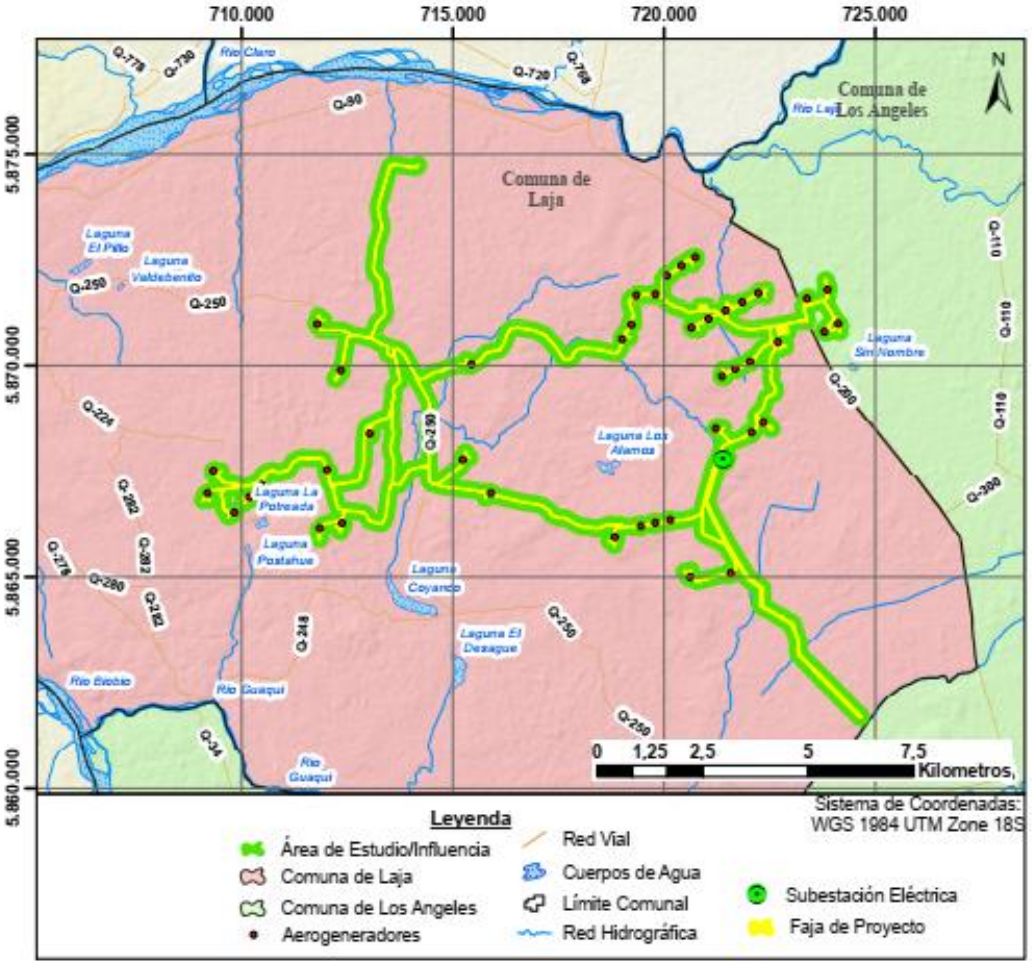
Lvb: Es el menor nivel de velocidad en [VdB] obtenido en la Línea Base en los receptores representativos (52 VdB).

Lvref: Es el nivel de velocidad de referencia de la maquinaria a utilizar en [VdB] medido a 25 [pies]. Rodillo Compactador con un Lv de 94 VdB a 25 pies.

D: Distancia entre el receptor y la fuente, en m.

De este modo se obtiene que el radio del AI es de 191 m desde cualquier elemento del proyecto. Sin embargo, bajo un criterio más conservador se utilizará una distancia mayor que corresponde a la recomendada por BS 5228-2:2009, de 200 m.

En la **Figura 1** se presenta el área de influencia en la condición más adversa (etapa construcción y cierre).



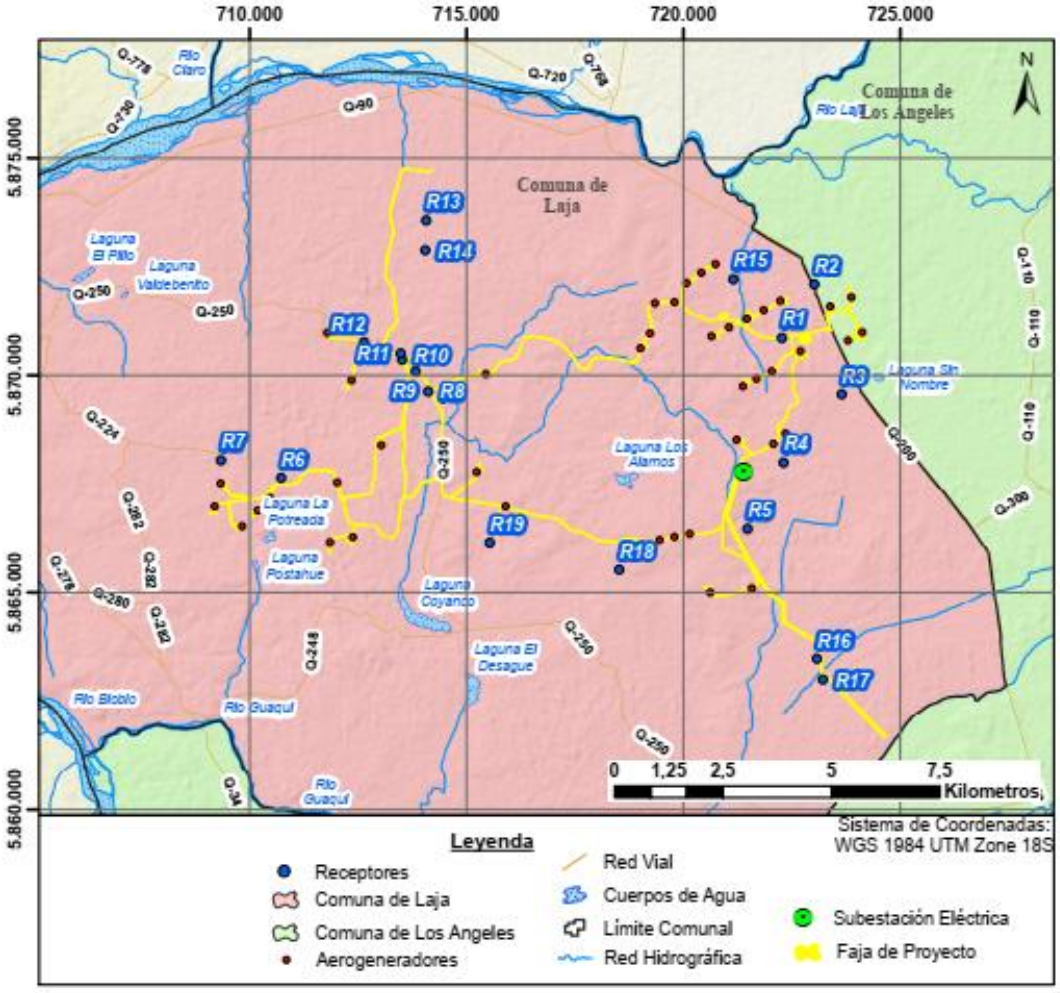
Fuente: Elaboración propia.

Figura 1. Área de Influencia del proyecto en condición más adversa (Construcción y cierre).

C.2 Identificación de Receptores Representativos

En **Tabla 1** y **Figura 2** se presenta la identificación, descripción y localización relativa al proyecto de los receptores representativos, los cuales fueron caracterizados y mencionados en el **Capítulo 3.1.8 Línea Base de Vibración Ambiental**.

Se debe considerar al receptor representativo como un receptor o punto de control, dado que representa a un grupo de receptores que se encuentra dentro o próximo al Área de Influencia. De este modo, si las proyecciones de Niveles de Velocidad Vibratoria en estos receptores representativos cumplen con los criterios de confort para las personas y daño estructural para las viviendas, por ende, se cumplirá para los receptores más alejados del proyecto



Fuente: Elaboración propia.

Figura 2. Ubicación Receptores Representativos.

Tabla 1. Identificación, descripción, ubicación de receptores humanos y fuentes vibratorias más cercanas al proyecto en la etapa de construcción.

ID Receptor	Descripción	Uso de Suelo	Altura Relativa Receptor, m	Coordenadas UTM Datum WGS 84, HUSO 18 H		Fuente Vibratoria Más Cercana	Distancia desde proyecto (m)
				Norte	Este		
R 1	Casa Inquilino interior y Bodegas Almacenamiento Parcela Los Quilales junto a camino interior de ripio.	Residencial	1,5	5.870.868	722.282	Tránsito camiones por camino interior	26
R 2	Grupo de casas de uso habitacional ubicadas junto a ruta Q-20, próximas a Aerogeneradores 26, 27 y 28	Residencial	1,5	5.872.091	723.030	Rodillo Compactador para caminos y bases Aerogenerador 26, 27 y 28	500
R 3	Grupo de casas de uso habitacional dispersas próximas a Aerogeneradores 35 y 36.	Residencial	1,5	5.869.556	723.657	Rodillo Compactador para caminos y bases Aerogenerador 35 y 36	390
R 4	Parcelas de particulares y casas de uso habitacional próximas a caminos accesos, Subestación e Instalación de Faenas 2	Residencial	1,5	5.867.980	722.320	Rodillo Compactador para caminos, bases Subestación y Torres Transmisión	650
R 5	Grupo de casas de uso habitacional próximas a Torres Alta Tensión 5 y 6	Residencial	1,5	5.866.452	721.489	Rodillo Compactador para caminos, bases Torres Transmisión	340
R 6	Grupo de casas de uso habitacional dispersas próximas a caminos internos del proyecto y Aerogeneradores 8 y 9	Residencial	1,5	5.867.626	710.736	Rodillo Compactador para caminos y bases Aerogenerador 8 y 9	100
R 7	Grupo de casas de uso habitacional próximas a Aerogenerador 5 y caminos internos del proyecto	Residencial	1,5	5.868.029	709.348	Rodillo Compactador para camino interno y base aerogenerador 5	535
R 8	Casa de uso habitacional ubicadas junto a ruta Q-250, frente camino acceso a Aerogenerador 3	Residencial	1,5	5.869.613	714.193	Motoniveladora y Camiones en camino acceso a aerogenerador 3	40
R 9	Grupo de casas de uso habitacional ubicadas junto a ruta Q-250 próximas a	Residencial	1,5	5.870.085	713.831	Motoniveladora y Camiones en camino acceso	100

ID Receptor	Descripción	Uso de Suelo	Altura Relativa Receptor, m	Coordenadas UTM Datum WGS 84, HUSO 18 H		Fuente Vibratoria Más Cercana	Distancia desde proyecto (m)
				Norte	Este		
	caminos internos proyecto					a aerogenerador	
R 10	Instalaciones industriales junto a ruta Q-250, y caminos internos proyecto	Residencial	1,5	5.870.353	713.520	Motoniveladora y Camiones en camino acceso a aerogenerador	30
R 11	Casa de uso habitacional ubicada junto a ruta Q-250 y acceso a caminos internos proyecto	Residencial	1,5	5.870.495	713.492	Motoniveladora y Camiones en camino acceso a aerogenerador	30
R 12	Casa de uso habitacional ubicada junto a ruta Q-250 próxima acceso caminos internos proyecto hacia Aerogenerador 2	Residencial	1,5	5.870.750	712.648	Motoniveladora y Camiones en camino acceso a aerogenerador 1 y 2	50
R 13	Casa de uso habitacional ubicada junto a camino interno proyecto	Residencial	1,5	5.873.557	714082	Motoniveladora y Camiones en camino acceso a Parque Eólico	800
R 14	Casa de uso habitacional ubicada junto a camino interno proyecto	Residencial	1,5	5.872.870	714.057	Motoniveladora y Camiones en camino acceso a Parque Eólico	800
R 15	Casas de uso habitacional ubicadas próxima a Aerogeneradores 19, 20 y 21	Residencial	1,5	5.866.452	721.489	Rodillo Compactador para bases Aerogenerador 19, 20 y 21	520
R 16	Casa de uso habitacional ubicada próxima a Torre Alta Tensión 15	Residencial	1,5	5.863.464	723.091	Rodillo Compactador para base Torre Transmisión 15	75
R 17	Casa de uso habitacional ubicada próxima a Torre Alta Tensión 16	Residencial	1,5	5.862.989	723.227	Rodillo Compactador para base Torre Transmisión 16	180
R18	Grupo de casas de uso habitacional próximas a aerogenerador 41	Residencial	1,5	5.865.518	718.527	Rodillo Compactador para bases Aerogenerador 41	375
R19	Grupo de casas de uso habitacional próximas a aerogenerador 14	Residencial	1,5	5.866.134	715.544	Rodillo Compactador para base Aerogenerador 14	850
R20	Grupo de casas de uso habitacional ubicadas junto a Media Luna Sector Las Peñas y casas	Residencial	1,5	5.871.590	711.912	Rodillo Compactador para bases Aerogenerador 1	430

ID Receptor	Descripción	Uso de Suelo	Altura Relativa Receptor, m	Coordenadas UTM Datum WGS 84, HUSO 18 H		Fuente Vibratoria Más Cercana	Distancia desde proyecto (m)
				Norte	Este		
	dispersas junto a ruta Q-250, próximas a Aerogenerador 1						

Fuente: Elaboración propia.

C.3 Normativa Referencia FTA 2018

Como se explicó en el Capítulo 3.1.8. Línea Base de Vibración Ambiental, la normativa aplicable es la "Transit Noise and vibration Impact Assessment", elaborada por la Federal Transit Administration (FTA) de EEUU, la cual está orientado solo a vibraciones generadas por actividades humanas a receptores humanos y edificaciones. Para el caso de fauna y flora silvestre no se cuenta con normativa de referencia tanto nacional como internacional.

La FTA 2018 indica que las actividades emisoras de vibración se evalúan por separado según sus posibles efectos. Uno tiene relación con la respuesta humana a la vibración generada (molestia), y otro relacionado con el posible daño estructural (cosmético), que pudiesen generar hacia los edificios cercanos aquellas actividades que generan una mayor vibración. En consecuencia, se establecen valores de daño sobre estructura y criterios de molestia a partir de Velocidad Peak de Partícula (VPP) en [pulg/seg] y Nivel de Velocidad (Lv) en [VdB], respectivamente.

De acuerdo con lo analizado en **Capítulo 3.1.8 Línea de Base Vibración Ambiental**, en **Tabla 2** se establecen los Límites aplicables a cada receptor según criterio de confort y daño estructural.

Tabla 2. Límites aplicables a cada receptor según criterio de confort y daño estructural en cada receptor.

ID Receptor	Tipo Receptor	Tipo Evento Vibratorio	Categoría Edificación	Límite Norma Referencia FTA 2018	
				Confort	Daño Estructural
R 1	Residencial	Ocasional	III. Madera y mampostería sin diseño de ingeniería	75	94
R 2	Residencial	Ocasional	III. Madera y mampostería sin diseño de ingeniería	75	94
R 3	Residencial	Ocasional	III. Madera y mampostería sin diseño de ingeniería	75	94
R 4	Residencial	Ocasional	III. Madera y mampostería sin diseño de ingeniería	75	94
R 5	Residencial	Ocasional	III. Madera y mampostería sin diseño de ingeniería	75	94
R 6	Residencial	Ocasional	III. Madera y mampostería sin diseño de ingeniería	75	94
R 7	Residencial	Ocasional	III. Madera y mampostería sin diseño de ingeniería	75	94
R 8	Residencial	Ocasional	III. Madera y mampostería sin diseño de ingeniería	75	94
R 9	Residencial	Ocasional	III. Madera y mampostería sin diseño de ingeniería	75	94
R 10	Residencial	Ocasional	III. Madera y mampostería sin diseño de ingeniería	75	94
R 11	Residencial	Ocasional	III. Madera y mampostería sin diseño de ingeniería	75	94
R 12	Residencial	Ocasional	III. Madera y mampostería sin diseño de ingeniería	75	94
R 13	Residencial	Ocasional	III. Madera y mampostería sin diseño de ingeniería	75	94
R 14	Residencial	Ocasional	III. Madera y mampostería sin diseño de ingeniería	75	94
R 15	Residencial	Ocasional	III. Madera y mampostería sin diseño de ingeniería	75	94
R 16	Residencial	Ocasional	III. Madera y mampostería sin diseño de ingeniería	75	94
R 17	Residencial	Ocasional	III. Madera y mampostería sin diseño de ingeniería	75	94
R 18	Residencial	Ocasional	III. Madera y mampostería sin diseño de ingeniería	75	94
R 19	Residencial	Ocasional	III. Madera y mampostería sin diseño de ingeniería	75	94
R 20	Residencial	Ocasional	III. Madera y mampostería sin diseño de ingeniería	75	94

Fuente: Elaboración propia.

C.4 Modelación Emisiones Vibratorias

El uso de maquinaria pesada genera ondas vibratorias que disminuyen en intensidad a medida que aumenta la distancia entre la actividad emisora y el receptor. Las edificaciones cercanas a estas actividades pueden verse afectadas a las vibraciones, cuyos efectos varían desde niveles casi imperceptibles, como ruido de baja frecuencia con percepción moderada, hasta efectos relevantes en las estructuras o en alguna parte de éstas.

Generalmente estas actividades no suelen causar deterioro en las estructuras, sin embargo, pueden alcanzar rangos audibles y sensitivos en sectores con edificaciones cercanas al sitio de faenas.

El método de estimación de velocidad vibratoria está basado en la normativa "*Transit Noise and Vibration Impact Assessment*", normativa que es de igual forma utilizada para la evaluación de efectos sobre estructuras y molestia sobre sitios habitados para actividades con maquinaria de construcción.

A continuación, se indica la ecuación utilizada para modelar las emisiones vibratorias Lvp:

$$L_{vp} = L_{vref} - 30 * log_{10}\left(\frac{D}{25}\right) \qquad \textbf{Ecuación 2}$$

Donde:

L_{vp}: Es el nivel de velocidad en [VdB] proyectado en el receptor.

L_{vref}: Es el nivel de velocidad de referencia en [VdB] medido a 25 [pies].

D: Distancia (en pies) entre el receptor y la fuente.

En **Tabla 3** se detallan emisiones de vibraciones de referencia de distintas maquinarias, medidos a 25 pies de distancia establecidos en Tabla 7-4 de la FTA 2018, para la modelación de los Niveles de Velocidad Vibratoria para las etapas de construcción y cierre del proyecto.

Tabla 3. Velocidad peak de partícula y niveles de vibración de distintas maquinarias, medidos a 25 pies de distancia, de referencia para modelación.

Maquinaria	PPV a 25 pies [pulg/seg]	Lv a 25 pies [VdB]
Hincadora Típica	0,644	104
Rodillo Compactador	0,210	94
Martillo percutor en excavadora	0,089	87
Bulldozer grande	0,089	87
Perforadora	0,089	87
Excavador Hidráulico	0,089	87
Cargadores Grandes	0,089	87
Camión pesado	0,076	86
Martillo Neumático	0,035	79
Cargadores Pequeños (Minicargador)	0,003	58

Fuente: Tabla 7-4, "Transit Noise and Vibration Impact Assessment", elaborada por la Federal Transit Administration (FTA), 2018.

Cabe señalar que bajo un criterio conservador la proyección y evaluación debe considerar la maquinaria de mayor emisión para cada etapa del Proyecto, con la finalidad de representar y evaluar el cumplimiento normativo para un escenario adverso. Además, la distancia entre fuente y receptor debe corresponder a la separación mínima entre la ubicación del receptor y las fuentes vibratorias del Proyecto.

C.5 Caracterización de fuentes vibratorias del proyecto

A continuación, se presentan las actividades y maquinarias requeridas en cada etapa del Proyecto.

C.5.1 Etapa de Construcción

Para la construcción de las obras es necesaria la utilización de diversa maquinaria pesada, la cual efectuará principalmente labores de movimiento de tierra, habilitación de caminos, fundaciones, montaje de estructuras, etc. Estas maquinarias generalmente no funcionan de forma simultánea, sino que de forma secuencial en el tiempo o en pequeños grupos de trabajo.

Las obras de construcción se realizarán mediante el uso de Retroexcavadoras, Bulldozer, Rodillo Compactador, Motoniveladora, Cargadores Frontales, entre otros; generando áreas de trabajos que se denominan actividades.

Las principales fuentes de vibración en las diversas actividades en la etapa de construcción se detallan a continuación:

Tabla 4. Descripción, caracterización y régimen emisión de fuentes vibratorias actividad Instalación de Faenas

ACTIVIDAD: Instalación de Faenas			**ETAPA: Construcción**		
Descripción Fuente Vibratoria	**Cantidad Fuentes**	**Tipo Vibración**	**Régimen Emisión**	**Nivel de Vibración a 25 pies (VdB)**	**Referencia del dato**
Generador 50 [kVA] Se homologa a Cargadores Pequeños	6	Actividad Humana	Periodico 8 a 18 hrs	58	Tabla 7-4 FTA 2018

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5. Descripción, caracterización y régimen emisión de fuentes vibratorias actividad Planta de Hormigón

ACTIVIDAD: Planta de Hormigón			**ETAPA: Construcción**		
Descripción Fuente Vibratoria	**Cantidad Fuentes**	**Tipo Vibración**	**Régimen Emisión**	**Nivel de Vibración a 25 pies (VdB)**	**Referencia del dato**
Generador 100 [kVA] Se homologa a Cargadores Pequeños	2	Actividad Humana	Periodico 8 a 18 hrs	58	Tabla 7-4 FTA 2018
Planta de Hormigón Se homologa a Cargadores Grandes	2	Actividad Humana	Periodico 8 a 18 hrs	87	Tabla 7-4 FTA 2018
Camión Combustible	1	Actividad Humana	Periodico 8 a 18 hrs	86	Tabla 7-4 FTA 2018

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6. Descripción, caracterización y régimen emisión de fuentes vibratorias actividad Habilitación de Caminos

ACTIVIDAD: Habilitación de Caminos			ETAPA: Construcción		
Descripción Fuente Vibratoria	**Cantidad Fuentes**	**Tipo Vibración**	**Régimen Emisión**	**Nivel de Vibración a 25 pies (VdB)**	**Referencia del dato**
Motoniveladora Se homologa a Cargadores Grandes	3	Actividad Humana	Periodico 8 a 18 hrs	87	Tabla 7-4 FTA 2018
Rodillo Compactador (Vibratorio)	3	Actividad Humana	Periodico 8 a 18 hrs	94	Tabla 7-4 FTA 2018
Camión Aljibe	2	Actividad Humana	Periodico 8 a 18 hrs	86	Tabla 7-4 FTA 2018
Bulldozer	2	Actividad Humana	Periodico 8 a 18 hrs	87	Tabla 7-4 FTA 2018
Camión Tolva	8	Actividad Humana	Periodico 8 a 18 hrs	86	Tabla 7-4 FTA 2018

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7. Descripción, caracterización y régimen emisión de fuentes vibratorias actividad Montaje Aerogeneradores y Fundaciones.

ACTIVIDAD: Montaje Aerogeneradores y Fundaciones			ETAPA: Construcción		
Descripción Fuente Vibratoria	**Cantidad Fuentes**	**Tipo Vibración**	**Régimen Emisión**	**Nivel de Vibración a 25 pies (VdB)**	**Referencia del dato**
Grúa 125 [m] Se homologa a Camión Pesado	2	Actividad Humana	Periodico 8 a 18 hrs	86	Tabla 7-4 FTA 2018
Grúa 80 [m] Se homologa a Camión Pesado	3	Actividad Humana	Periodico 8 a 18 hrs	86	Tabla 7-4 FTA 2018
Camión cama baja	14	Actividad Humana	Periodico 8 a 18 hrs	86	Tabla 7-4 FTA 2018
Camión de carga	1	Actividad Humana	Periodico 8 a 18 hrs	86	Tabla 7-4 FTA 2018
Camión grúa	3	Actividad Humana	Periodico 8 a 18 hrs	86	Tabla 7-4 FTA 2018
Camión Mixer	6	Actividad Humana	Periodico 8 a 18 hrs	86	Tabla 7-4 FTA 2018
Bomba hormigón Se homologa a Camión Pesado	2	Actividad Humana	Periodico 8 a 18 hrs	86	Tabla 7-4 FTA 2018
Grúa 50 ton Se homologa a Camión Pesado	1	Actividad Humana	Periodico 8 a 18 hrs	86	Tabla 7-4 FTA 2018
Excavadora tipo D320	6	Actividad Humana	Periodico 8 a 18 hrs	87	Tabla 7-4 FTA 2018

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 8. Descripción, caracterización y régimen emisión de fuentes vibratorias actividad Construcción Subestación Eléctrica

ACTIVIDAD: Construcción Subestación Eléctrica			ETAPA: Construcción		
Descripción Fuente Vibratoria	**Cantidad Fuentes**	**Tipo Vibración**	**Régimen Emisión**	**Nivel de Vibración a 25 pies (VdB)**	**Referencia del dato**
Motoniveladora Se homologa a Cargadores Grandes	1	Actividad Humana	Periodico 8 a 18 hrs	87	Tabla 7-4 FTA 2018
Rodillo Compactador (Vibratorio)	1	Actividad Humana	Periodico 8 a 18 hrs	94	Tabla 7-4 FTA 2018
Camión Mixer	6	Actividad Humana	Periodico 8 a 18 hrs	86	Tabla 7-4 FTA 2018
Excavadora tipo D320	1	Actividad Humana	Periodico 8 a 18 hrs	87	Tabla 7-4 FTA 2018
Grúa 50 ton Se homologa a Camión Pesado	1	Actividad Humana	Periodico 8 a 18 hrs	86	Tabla 7-4 FTA 2018
Retroexcavadora tipo 416	1	Actividad Humana	Periodico 8 a 18 hrs	87	Tabla 7-4 FTA 2018

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 9. Descripción, caracterización y régimen emisión de fuentes vibratorias actividad Estructuras Líneas Alta Tensión

ACTIVIDAD: Estructuras Líneas Alta Tensión			ETAPA: Construcción		
Descripción Fuente Vibratoria	**Cantidad Fuentes**	**Tipo Vibración**	**Régimen Emisión**	**Nivel de Vibración a 25 pies (VdB)**	**Referencia del dato**
Camión Grúa	2	Actividad Humana	Periodico 8 a 18 hrs	86	Tabla 7-4 FTA 2018
Retroexcavadora tipo 416 Se homologa a Excavador Hidráulico	1	Actividad Humana	Periodico 8 a 18 hrs	87	Tabla 7-4 FTA 2018
Camión de Carga	1	Actividad Humana	Periodico 8 a 18 hrs	86	Tabla 7-4 FTA 2018
Winche y freno Se homologa a Camión	1	Actividad Humana	Periodico 8 a 18 hrs	86	Tabla 7-4 FTA 2018
Camión Mixer	6	Actividad Humana	Periodico 8 a 18 hrs	86	Tabla 7-4 FTA 2018

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 10. Descripción, caracterización y régimen emisión de fuentes vibratorias actividad Desmontaje, traslado y montaje de grúas.

ACTIVIDAD: Desmontaje, traslado y montaje de grúas			**ETAPA: Construcción**		
Descripción Fuente Vibratoria	**Cantidad Fuentes**	**Tipo Vibración**	**Régimen Emisión**	**Nivel de Vibración a 25 pies (VdB)**	**Referencia del dato**
Camión cama baja	20	Actividad Humana	Periodico 21 a 7 hrs	86	Tabla 7-4 FTA 2018
Grúas Se homologa a Camión Pesado	2	Actividad Humana	Periodico 21 a 7 hrs	86	Tabla 7-4 FTA 2018

Fuente: Elaboración propia.

Como se indicó las obras de construcción se realizarán mediante el uso de Retroexcavadoras, Bulldozer, Rodillo Compactador, Motoniveladora, Cargadores Frontales, entre otros; generando áreas de trabajos que se denominan actividades. En base a lo anterior, y de acuerdo con la emisión vibratoria de cada maquinaria indicada en **Tablas 4, 5, 6, 7, 8, 9 y 10**, la estimación de vibraciones se realizó considerando un escenario adverso durante la operación de un Rodillo Compactador **con un Lv de 94 VdB a 25 pies para la construcción de las bases** de los aerogeneradores, **Motoniveladora** con un **Lv de 87 VdB** y **Camión Tolva** con un **Lv de 86 VdB** a 25 pies para el tránsito y/o construcción de los demás elementos del proyecto.

C.5.2 Etapa de Operación

La etapa de operación de parques eólicos es muy simple, debido a que los equipos son operados a distancia, requieren bajo mantenimiento y por períodos muy acotados de tiempo.

Las acciones en esta etapa están orientadas a la operación y mantención del parque eólico y sus obras asociadas. Entre las acciones más relevantes se distingue:

- Proceso de generación de energía y entrega al Sistema Eléctrico Nacional (SEN).
- Actividades de mantención y conservación.
- Flujos y rutas vehiculares.

Las principales fuentes de vibración durante la operación del proyecto corresponden a los Aerogeneradores y en menor grado el tránsito de vehículos livianos (camionetas) por los caminos internos.

Como no existe un modelo de emisión de vibraciones para muchos proyectos en fase de operación, se puede estimar las emisiones vibratorias basándose en mediciones de proyectos similares. De este modo en la **Tabla 11** se presenta la cantidad de aerogeneradores del proyecto y régimen de emisión. Como nivel de velocidad vibratoria se presenta un valor referencial medido a 360 m de un grupo de 3 aerogeneradores de otro titular ubicados próximo a la comuna de Laja (**Apéndice 1)**.

Tabla 11. Descripción, caracterización y periodo de generación de fuentes vibratorias Etapa de Operación

ACTIVIDAD: Generación Energía				**ETAPA: Operación**	
Descripción Fuente Vibratoria	**Cantidad Fuentes**	**Tipo Vibración**	**Régimen Emisión**	**Nivel de Velocidad Vibratoria (VdB) medido a 360 m**	**Fuente**
Generador Eólico	60	Actividad Humana	Continua 24 hrs	52*	Medición Propia (Apendice)

Fuente: Elaboración propia.

Nota: (*) Nivel de Velocidad Vibratoria medida en un grupo de 3 aerogeneradores a una distancia de 360 m

C.5.3 Etapa de Cierre

El término de la etapa de operación se plantea inicialmente tras 30 años de funcionamiento. Sin embargo, se considera que la vida útil del proyecto puede ser prolongada indefinidamente a partir de una adecuada mantención de las instalaciones y la implementación de mejoras tecnológicas.

La primera actividad para realizar en caso de desmantelamiento de los aerogeneradores será el retiro y posterior eliminación de los aceites, grasas y demás productos contaminantes que se encuentran en la góndola del aerogenerador.

Luego, a través de la utilización de grúas de gran tonelaje se realizarán actividades de desatornillado, descenso de rotor, aspas y góndola, desatornillado progresivo de los tramos que componen la torre, etc.

Los componentes del aerogenerador serán enviados a un receptor autorizado, con objeto de realizar el reciclaje de todos sus elementos, incluso el equipamiento eléctrico y cableado.

Respecto al desmantelamiento de las fundaciones, se realizarán actividades de demolición de la parte superior sobresaliente de esta estructura. Cabe mencionar que las actividades de desmantelamiento afectarán a todas las instalaciones que integran el proyecto excepto aquellas estructuras que queden por debajo de la superficie del terreno a más de un metro de profundidad.

Las principales fuentes de vibración durante la etapa de cierre se detallan en **Tabla 12**:

Tabla 12. Descripción, caracterización de fuentes vibratorias en etapa de cierre

ACTIVIDAD: Desmontaje estructuras y Preparación de Terrenos			**ETAPA: Cierre**		
Descripción Fuente Vibratoria	**Cantidad Fuentes**	**Tipo Vibración**	**Régimen Emisión**	**Nivel de Vibración a 25 pies (VdB)**	**Referencia del dato**
Camión Tolva	11	Actividad Humana	Periodico 8 a 18 hrs	86	Tabla 7-4 FTA 2018
Camión Cama Baja	6	Actividad Humana	Periodico 8 a 18 hrs	86	Tabla 7-4 FTA 2018
Camión Cama Baja	5	Actividad Humana	Periodico 8 a 18 hrs	86	Tabla 7-4 FTA 2018
Camión Aljibe	5	Actividad Humana	Periodico 8 a 18 hrs	86	Tabla 7-4 FTA 2018
Retroexcavadora	8	Actividad Humana	Periodico 8 a 18 hrs	87	Tabla 7-4 FTA 2018
Camión Carga 3/4	9	Actividad Humana	Periodico 8 a 18 hrs	86	Tabla 7-4 FTA 2018
Camión Grúa Carga-Descarga	2	Actividad Humana	Periodico 8 a 18 hrs	86	Tabla 7-4 FTA 2018
Grúa montaje 125 m	1	Actividad Humana	Periodico 8 a 18 hrs	86	Tabla 7-4 FTA 2018
Grúa montaje 80 m	2	Actividad Humana	Periodico 8 a 18 hrs	86	Tabla 7-4 FTA 2018

Fuente: Elaboración propia.

En la actividad de cierre se utilizarán camiones, retroexcavadoras, entre otros; generando áreas de trabajos que se denominan actividades. En base a lo anterior, y de acuerdo con la emisión vibratoria de cada maquinaria que indica la **Tabla 12**, la estimación de vibraciones se realizó considerando un escenario adverso del uso de una **Retroexcavadora** con un **Lv de 87 VdB** a 25 pies.

D. RESULTADOS

D.1. Etapa de Construcción

En **Tabla 13** y **Tabla 14** se presentan los resultados de la modelación de los Niveles de Velocidad Vibratoria y Evaluación Cumplimiento de Criterios de Confort y Daño Estructural, respectivamente, en Etapa de Construcción.

Tabla 13. Niveles de Velocidad Vibratoria Proyectados y Evaluación Cumplimiento Criterio Confort en Etapa Construcción.

ID Receptor	Frente de Trabajo más cercano al receptor	Fuente Vibratoria más cercana al receptor	Lvref, VdB	Distancia Fuente – receptor, m	Lvp, VdB	Criterio Confort VdB	Evaluación Cumple/ No Cumple
R 1	Tránsito de Camiones por caminos internos	Camión Tolva	86	26	70	75	Cumple
R 2	Construcción Base Aerogeneradores 26, 27 y 28	Rodillo Compactador	94	500	39	75	Cumple
R 3	Construcción Base Aerogeneradores 35 y 36	Rodillo Compactador	94	390	43	75	Cumple
R 4	Construcción Bases Subestación y Torres Transmisión	Rodillo Compactador	94	650	36	75	Cumple
R 5	Construcción Bases Torres Transmisión 5 y 6	Rodillo Compactador	94	340	45	75	Cumple
R 6	Construcción Bases de Aerogeneradores 8 y 9	Rodillo Compactador	94	100	60	75	Cumple
R 7	Construcción Base Aerogenerador 5	Rodillo Compactador	94	535	39	75	Cumple
R 8	Construcción y Mantención caminos internos Parque Eólico	Motoniveladora	87	40	65	75	Cumple
R 9	Construcción y Mantención caminos internos Parque Eólico	Motoniveladora	87	100	53	75	Cumple
R 10	Construcción y Mantención caminos internos Parque Eólico	Motoniveladora	87	30	69	75	Cumple
R 11	Construcción y Mantención	Motoniveladora	87	30	69	75	Cumple

ID Receptor	Frente de Trabajo más cercano al receptor	Fuente Vibratoria más cercana al receptor	Lvref, VdB	Distancia Fuente – receptor, m	Lvp, VdB	Criterio Confort VdB	Evaluación Cumple/ No Cumple
	caminos internos Parque Eólico						
R 12	Construcción y Mantención caminos internos Parque Eólico	Motoniveladora	87	50	62	75	Cumple
R 13	Construcción y Mantención caminos internos Parque Eólico	Motoniveladora	87	800	26	75	Cumple
R 14	Construcción y Mantención caminos internos Parque Eólico	Motoniveladora	87	800	26	75	Cumple
R 15	Construcción Bases de Aerogeneradores 19, 20 y 21	Rodillo Compactador	94	520	39	75	Cumple
R 16	Construcción Bases Torres Transmisión	Rodillo Compactador	94	75	64	75	Cumple
R 17	Construcción Bases Torres Transmisión	Rodillo Compactador	94	180	53	75	Cumple
R 18	Construcción Base Aerogenerador 41	Rodillo Compactador	94	375	43	75	Cumple
R 19	Construcción Base Aerogenerador 14	Rodillo Compactador	94	850	33	75	Cumple
R 20	Construcción Base Aerogenerador 1	Rodillo Compactador	94	430	41	75	Cumple

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 14. Niveles de Velocidad Vibratoria Proyectados y Evaluación Cumplimiento Criterio Daño Estructural en Etapa de Construcción.

ID Receptor	Frente de Trabajo más cercano al receptor	Fuente Vibratoria más cercana al receptor	Lvref, VdB	Distancia Fuente – receptor, m	Lvp, VdB	Criterio Daño Estructural, VdB	Evaluación Cumple/ No Cumple
R 1	Tránsito de Camiones por caminos internos	Camión Tolva	86	26	70	94	Cumple
R 2	Construcción Base Aerogeneradores 26, 27 y 28	Rodillo Compactador	94	500	39	94	Cumple
R 3	Construcción Base Aerogeneradores 35 y 36	Rodillo Compactador	94	390	43	94	Cumple
R 4	Construcción Bases Subestación y Torres Transmisión	Rodillo Compactador	94	650	36	94	Cumple
R 5	Construcción Bases Torres Transmisión 5 y 6	Rodillo Compactador	94	340	45	94	Cumple
R 6	Construcción Bases de Aerogeneradores 8 y 9	Rodillo Compactador	94	100	60	94	Cumple
R 7	Construcción Base Aerogenerador 5	Rodillo Compactador	94	535	39	94	Cumple
R 8	Construcción y Mantención caminos internos Parque Eólico	Motoniveladora	87	40	65	94	Cumple
R 9	Construcción y Mantención caminos internos Parque Eólico	Motoniveladora	87	100	53	94	Cumple
R 10	Construcción y Mantención caminos internos Parque Eólico	Motoniveladora	87	30	69	94	Cumple
R 11	Construcción y Mantención caminos internos Parque Eólico	Motoniveladora	87	30	69	94	Cumple

ID Receptor	Frente de Trabajo más cercano al receptor	Fuente Vibratoria más cercana al receptor	Lvref, VdB	Distancia Fuente – receptor, m	Lvp, VdB	Criterio Daño Estructural, VdB	Evaluación Cumple/ No Cumple
R 12	Construcción y Mantención caminos internos Parque Eólico	Motoniveladora	87	50	62	94	Cumple
R 13	Construcción y Mantención caminos internos Parque Eólico	Motoniveladora	87	800	26	94	Cumple
R 14	Construcción y Mantención caminos internos Parque Eólico	Motoniveladora	87	800	26	94	Cumple
R 15	Construcción Bases de Aerogeneradores 19, 20 y 21	Rodillo Compactador	94	520	39	94	Cumple
R 16	Construcción Bases Torres Transmisión	Rodillo Compactador	94	75	64	94	Cumple
R 17	Construcción Bases Torres Transmisión	Rodillo Compactador	94	180	53	94	Cumple
R 18	Construcción Base Aerogenerador 41	Rodillo Compactador	94	375	43	94	Cumple
R 19	Construcción Base Aerogenerador 14	Rodillo Compactador	94	850	33	94	Cumple
R 20	Construcción Base Aerogenerador 1	Rodillo Compactador	94	430	41	94	Cumple

Fuente: Elaboración Propia.

D.2. Cumplimiento normativo Etapa de Construcción

A través de los resultados presentados en **Tabla 13** y **Tabla 14** se puede observar lo siguiente:

- En todos los receptores representativos, los niveles de velocidad vibratoria proyectados se encuentran bajo el criterio de confort. De este modo se cumple con el Criterio de Confort.

- En todos los receptores representativos, los niveles de velocidad vibratoria proyectados se encuentran bajo el criterio de daño estructural. De este modo se cumple con el Criterio de Daño Estructural.
- En ambos casos se cumple con los Límites recomendados por la FTA 2018 que son aplicables tanto en horario diurno como nocturno.

D.3 Etapa de Operación

Debido a que la normativa de referencia FTA 2018 solo presenta límites de niveles vibratorios para maquinaria de construcción, para evaluar las emisiones generadas por los aerogeneradores se utilizara un criterio conservador que corresponde a los Niveles de Velocidad Vibratoria obtenidos en el capítulo de Línea Base Vibraciones y los Niveles de Umbral de Percepción, valores que están muy por debajo de los Límites establecidos en otro tipo de normativas internacionales.

En **Tabla 15** y **Tabla 16** se presentan los resultados de los Niveles de Velocidad Vibratoria y comparación con Línea Base y Umbral de Percepción, en Etapa de Operación en horario diurno y nocturno, respectivamente.

Tabla 15. Niveles de Velocidad Vibratoria proyectados v/s niveles determinados en Línea Base y Umbral de Percepción en Etapa de Operación en horario diurno.

ID Receptor	Lv medido a 360 m, VdB	Distancia entre receptor y aerogenerador más cercano (m)*	Lv Línea Base, VdB	Lv, Umbral Percepción, VdB	Evaluación
R 1	52	520	53	65	Bajo Línea Base y Umbral de Percepción
R 2	52	530	56	65	Bajo Línea Base y Umbral de Percepción
R 3	52	580	53	65	Bajo Línea Base y Umbral de Percepción
R 4	52	500	53	65	Bajo Línea Base y Umbral de Percepción
R 5	52	1380	52	65	Bajo Línea Base y Umbral de Percepción
R 6	52	510	59	65	Bajo Línea Base y Umbral de Percepción
R 7	52	570	59	65	Bajo Línea Base y Umbral de Percepción
R 8	52	1390	52	65	Bajo Línea Base y Umbral de Percepción
R 9	52	1435	52	65	Bajo Línea Base y Umbral de Percepción

ID Receptor	Lv medido a 360 m, VdB	Distancia entre receptor y aerogenerador más cercano (m)*	Lv Línea Base, VdB	Lv, Umbral Percepción, VdB	Evaluación
R 10	52	1240	52	65	Bajo Línea Base y Umbral de Percepción
R 11	52	1280	52	65	Bajo Línea Base y Umbral de Percepción
R 12	52	870	52	65	Bajo Línea Base y Umbral de Percepción
R 13	52	3440	58	65	Bajo Línea Base y Umbral de Percepción
R 14	52	2930	58	65	Bajo Línea Base y Umbral de Percepción
R 15	52	540	53	65	Bajo Línea Base y Umbral de Percepción
R 16	52	2220	52	65	Bajo Línea Base y Umbral de Percepción
R 17	52	2680	52	65	Bajo Línea Base y Umbral de Percepción
R 18	52	520	52	65	Bajo Línea Base y Umbral de Percepción
R 19	52	900	52	65	Bajo Línea Base y Umbral de Percepción
R 20	52	610	53	65	Bajo Línea Base y Umbral de Percepción

Fuente: Elaboración Propia.

Nota: (*) Distancia entre receptor y aerogenerador más cercano

Tabla 16. Niveles de Velocidad Vibratoria proyectados v/s niveles determinados en Línea Base y Umbral de Percepción en Etapa de Operación en horario nocturno.

ID Receptor	Lv medido a 360 m (VdB)	Distancia (m)*	Lv Línea Base (VdB)	Lv, Umbral Percepción, (VdB)	Evaluación
R 1	52	520	53	65	Bajo Línea Base y Umbral de Percepción
R 2	52	530	56	65	Bajo Línea Base y Umbral de Percepción
R 3	52	580	53	65	Bajo Línea Base y Umbral de Percepción
R 4	52	500	53	65	Bajo Línea Base y Umbral de Percepción
R 5	52	1380	52	65	Bajo Línea Base y Umbral de Percepción
R 6	52	510	59	65	Bajo Línea Base y Umbral de Percepción
R 7	52	570	59	65	Bajo Línea Base y Umbral de Percepción
R 8	52	1390	52	65	Bajo Línea Base y Umbral de Percepción

ID Receptor	Lv medido a 360 m (VdB)	Distancia (m)*	Lv Línea Base (VdB)	Lv, Umbral Percepción, (VdB)	Evaluación
R 9	52	1435	52	65	Bajo Línea Base y Umbral de Percepción
R 10	52	1240	52	65	Bajo Línea Base y Umbral de Percepción
R 11	52	1280	52	65	Bajo Línea Base y Umbral de Percepción
R 12	52	870	52	65	Bajo Línea Base y Umbral de Percepción
R 13	52	3440	58	65	Bajo Línea Base y Umbral de Percepción
R 14	52	2930	58	65	Bajo Línea Base y Umbral de Percepción
R 15	52	540	53	65	Bajo Línea Base y Umbral de Percepción
R 16	52	2220	52	65	Bajo Línea Base y Umbral de Percepción
R 17	52	2680	52	65	Bajo Línea Base y Umbral de Percepción
R 18	52	520	52	65	Bajo Línea Base y Umbral de Percepción
R 19	52	900	52	65	Bajo Línea Base y Umbral de Percepción
R 20	52	610	52	65	Bajo Línea Base y Umbral de Percepción

Fuente: Elaboración Propia.

Nota: (*) Distancia entre receptor y aerogenerador más cercano

D.4. Cumplimiento normativo Etapa de Operación

A través de los resultados presentados en **Tabla 15** y **Tabla 16** se puede observar lo siguiente:

- En todos los receptores representativos, los niveles de velocidad vibratoria proyectados son iguales a la Línea Base y bajo Umbral de Percepción en horario diurno.
- En todos los receptores representativos, los niveles de velocidad vibratoria proyectados son iguales a la Línea Base y bajo Umbral de Percepción en horario nocturno.

D.5. Etapa de Cierre

En **Tabla 17** y **Tabla 18** se presentan los resultados de la modelación de los Niveles de Velocidad Vibratoria y Evaluación Cumplimiento de Criterios de Confort y Daño Estructural, respectivamente, en Etapa de Cierre en horario diurno.

Tabla 17. Niveles de Velocidad Vibratoria Proyectados y Evaluación Cumplimiento Criterio Confort en Etapa de Cierre en horario diurno.

ID Receptor	Fuente Vibratoria más cercana al receptor	Lvref, (VdB)	Distancia Fuente - receptor, m	Lvp, (VdB)	Criterio Confort, VdB	Evaluación Cumple/ No Cumple
R 1	Retroexcavadora	87	26	71	75	Cumple
R 2	Retroexcavadora	87	500	32	75	Cumple
R 3	Retroexcavadora	87	390	36	75	Cumple
R 4	Retroexcavadora	87	650	29	75	Cumple
R 5	Retroexcavadora	87	340	38	75	Cumple
R 6	Retroexcavadora	87	100	53	75	Cumple
R 7	Retroexcavadora	87	535	32	75	Cumple
R 8	Retroexcavadora	87	40	65	75	Cumple
R 9	Retroexcavadora	87	100	53	75	Cumple
R 10	Retroexcavadora	87	30	69	75	Cumple
R 11	Retroexcavadora	87	30	69	75	Cumple
R 12	Retroexcavadora	87	50	62	75	Cumple
R 13	Retroexcavadora	87	800	26	75	Cumple
R 14	Retroexcavadora	87	800	26	75	Cumple
R 15	Retroexcavadora	87	520	32	75	Cumple
R 16	Retroexcavadora	87	75	57	75	Cumple
R 17	Retroexcavadora	87	180	46	75	Cumple
R 18	Retroexcavadora	87	375	36	75	Cumple
R 19	Retroexcavadora	87	850	26	75	Cumple
R 20	Retroexcavadora	87	430	34	75	Cumple

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 18. Niveles de Velocidad Vibratoria Proyectados y Evaluación Cumplimiento Criterio Daño Estructural en Etapa de Cierre en horario diurno.

ID Receptor	Fuente Vibratoria más cercana al receptor	Lvref, VdB	Distancia Fuente - receptor, m	Lvp, VdB	Criterio Daño Estructural, VdB	Evaluación Cumple/ No Cumple
R 1	Retroexcavadora	87	26	71	94	Cumple
R 2	Retroexcavadora	87	500	32	94	Cumple
R 3	Retroexcavadora	87	390	36	94	Cumple
R 4	Retroexcavadora	87	650	29	94	Cumple
R 5	Retroexcavadora	87	340	38	94	Cumple
R 6	Retroexcavadora	87	100	53	94	Cumple
R 7	Retroexcavadora	87	535	32	94	Cumple
R 8	Retroexcavadora	87	40	65	94	Cumple
R 9	Retroexcavadora	87	100	53	94	Cumple
R 10	Retroexcavadora	87	30	69	94	Cumple
R 11	Retroexcavadora	87	30	69	94	Cumple
R 12	Retroexcavadora	87	50	62	94	Cumple
R 13	Retroexcavadora	87	800	26	94	Cumple
R 14	Retroexcavadora	87	800	26	94	Cumple

R 15	Retroexcavadora	87	520	32	94	Cumple
R 16	Retroexcavadora	87	75	57	94	Cumple
R 17	Retroexcavadora	87	180	46	94	Cumple
R 18	Retroexcavadora	87	375	36	94	Cumple
R 19	Retroexcavadora	87	850	26	94	Cumple
R 20	Retroexcavadora	87	430	34	94	Cumple

Fuente: Elaboración Propia.

D.6. Cumplimiento normativo Etapa de Cierre en periodo diurno

A través de los resultados presentados en **Tabla 17** y **Tabla 18** se puede observar lo siguiente:

- En todos los receptores representativos, los niveles de velocidad vibratoria proyectados se encuentran bajo el criterio de confort. De este modo se cumple con el Criterio de Confort.
- En todos los receptores representativos, los niveles de velocidad vibratoria proyectados se encuentran bajo el criterio de daño estructural. De este modo se cumple con el Criterio de Daño Estructural.

E. CONCLUSIONES

Sobre la base de los resultados obtenidos se puede concluir lo siguiente:

E.1 Etapa de Construcción

De acuerdo con las modelaciones vibratorias efectuadas en la Etapa de Construcción, se cumplirán con los Criterios de Confort y Daño Estructural definidos en la FTA 2018, tanto en horario diurno como nocturno, sin la necesidad de implementar medidas de control.

E.2 Etapa de Operación

De acuerdo con las estimaciones vibratorias efectuadas en la Etapa de Operación, los niveles de velocidad vibratoria se encontrarán bajo la Línea Base y Umbral de Percepción, tanto en horario diurno como nocturno, sin la necesidad de implementar medidas de control.

E.3 Etapa de Cierre

De acuerdo con las modelaciones vibratorias efectuadas en la Etapa de Cierre, se cumplirán con los Criterios de Confort y Daño Estructural definidos en la FTA 2018, sin la necesidad de implementar medidas de control.

En términos generales la evaluación del impacto vibratorio ambiental, indica que no se producirán impactos significativos sobre los receptores durante las etapas de Construcción, Operación y Cierre del proyecto. Por lo anterior, se puede concluir que las emisiones de vibraciones se encontraran dentro de los Criterios de Confort y Daño Estructural definidos en la FTA 2018, descartándose riesgo sobre la salud hacia las personas.

F. BIBLIOGRAFÍA

U.S. Federal Transit Administration Report, Transit Noise and Vibration Impact Assessment, Edición septiembre 2018.

Guía sobre el Área de Influencia en el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental, Servicio de Evaluación Ambiental, 2017.

Guía para la Predicción y Evaluación de Impactos por Ruido y Vibración en el SEIA, Servicio de Evaluación Ambiental, 2019.

G. APÉNDICE I.

Ficha Medición de Nivel de Velocidad Vibratoria junto a Aerogeneradores

FICHA DE INFORMACIÓN DE MEDICIÓN DE VIBRACIÓN			
IDENTIFICACIÓN PUNTO MEDICIÓN			
Ubicación	Camino interior S/N, Sector Peñablanca		
Comuna	Laja		
Categoría Uso de Suelo	Habitacional		
Datum	WGS 84	Huso	18H
Coordenada Norte	5.871.967	Coordenada Este	716.216
Descripción del lugar de medición	a 360 m de Aerogeneradores		
Día Medición	22/11/2019		
Horario Medición Diurna	20:25		
Nivel Velocidad de Vibración (VdB)	52		



H. APÉNDICE II.
Extracto Manual FTA Transit Noise and Vibration Impact Assessment Manual

FTA

FEDERAL TRANSIT ADMINISTRATION

Transit Noise and Vibration Impact Assessment Manual

SEPTEMBER 2018

FTA Report No. 0123
Federal Transit Administration

PREPARED BY
John A. Volpe National Transportation Systems Center



U.S. Department of Transportation
Federal Transit Administration

Transit Noise and Vibration Impact Assessment Manual

SEPTEMBER 2018
FTA Report No. 0123

PREPARED BY

Antoinette Quagliata
Federal Transit Administration
Office of Planning and Environment

Meghan Ahearn
Eric Boeker
Christopher Roof
John A. Volpe National Transportation Systems Center
Cambridge, MA 02142

Lance Meister
Herbert Singleton
Cross Spectrum Acoustics
East Longmeadow, MA 01028
Utah: Salt Lake City, UT 84102

SPONSORED BY

Federal Transit Administration
Office of Planning and Environment
U.S. Department of Transportation
1200 New Jersey Avenue, SE
Washington, DC 20590

Table of Contents

SECTION 1: INTRODUCTION 1
1.1 PURPOSE 1
1.2 ORGANIZATION OF THE MANUAL 2

SECTION 2: PROJECT CLASS OF ACTION AND PLANNING 3
2.1 PROJECT CLASS OF ACTION 3
2.2 PROJECT PLANNING AND DEVELOPMENT 4
2.3 MITIGATION POLICY CONSIDERATIONS 5

SECTION 3: TRANSIT NOISE 9
3.1 NOISE METRICS 10
3.2 SOURCES OF TRANSIT VEHICLE NOISE 10
3.3 PATHS OF TRANSIT NOISE FROM SOURCE TO RECEIVER 14
3.4 RECEIVER RESPONSE TO TRANSIT NOISE 16

SECTION 4: NOISE IMPACT ANALYSIS 19
4.1 DETERMINE NOISE IMPACT CRITERIA. 20
Step 1: Identify Project Type. *21*
Step 2: Choose Land Use Category for FTA Criteria. *23*
Step 3: Determine Appropriate FTA Criteria Presentation *25*
4.2 DETERMINE NOISE ANALYSIS LEVEL 31
4.3 EVALUATE IMPACT: NOISE SCREENING PROCEDURE 33
Step 1: Identify Project Type *33*
Step 2: Determine the Screening Distance *33*
Step 3: Identify Study Area *34*
Step 4: Locate Noise-Sensitive Land Uses *34*
4.4 EVALUATE IMPACT: GENERAL NOISE ASSESSMENT 37
Step 1: Identify Noise-Sensitive Receivers *38*
Step 2: Determine Project Noise Source Reference Levels *39*
Step 3: Estimate Project Noise Exposure by Distance *48*
Step 4: Combine Noise Exposure from All Sources *49*
Step 5: Estimate Existing Noise Exposure *50*
Step 6: Inventory Noise Impacts *52*
Step 7: Determine Noise Mitigation Needs *54*
4.5 EVALUATE IMPACT: DETAILED NOISE ANALYSIS 64
Step 1: Identify Noise-Sensitive Receivers *66*
Step 2: Determine Project Noise Source Reference Levels *70*
Step 3: Determine Propagation Characteristics *84*
Step 4: Combine Noise Exposure from All Sources *91*
Step 5: Determine Existing Noise Exposure *92*
Step 6: Assess Noise Impact *95*
Step 7: Determine Noise Mitigation Measures *97*

SECTION 5: TRANSIT VIBRATION 109
5.1 GROUND-BORNE VIBRATION AND NOISE METRICS 110
5.2 SOURCES OF TRANSIT GROUND-BORNE VIBRATION AND NOISE 112
5.3 PATHS OF TRANSIT GROUND-BORNE VIBRATION AND NOISE 116

5.4 Receiver Factors that Influence Ground-Borne Vibration and Noise 117
5.5 Human Response to Transit Ground-borne Vibration and Noise 117

SECTION 6: VIBRATION IMPACT ANALYSIS 121
6.1 Determine Vibration Analysis Level 121
6.2 Determine Vibration Impact Criteria 123
Option A: General Vibration Assessment Criteria 123
Step 1: Land Use Categories 123
Step 2: Identify Event Frequency 125
Step 3: Apply Impact Criteria by Land Use and Event Frequency 125
Option B: Vibration Impact Criteria for a Detailed Vibration Analysis 130
Step 1: Ground-Borne Vibration 130
Step 2: Ground-borne Noise 132
6.3 Evaluate Impact: Vibration Screening Procedure 132
Step 1: Classify project vehicles 133
Step 2: Determine Project Type 134
Step 3: Determine Screening Distance 135
Step 4: Identify Vibration-Sensitive Land Uses 136
6.4 Evaluate Impact: General Vibration Assessment 136
Step 1: Select Base Curve for Ground Surface Vibration Level 136
Step 2: Apply Adjustments 139
Step 3: Inventory of Vibration Impact 147
6.5 Evaluate Impact: Detailed Vibration Analysis 149
Step 1: Characterize Existing Vibration Conditions 149
Step 2: Estimate Vibration Impact 152
Step 3: Assess Vibration Impact 165
Step 4: Determine Vibration Mitigation Measures 165

SECTION 7: NOISE AND VIBRATION DURING CONSTRUCTION 172
7.1 Construction Noise Assessment 172
Step 1: Determine Level of Construction Noise Assessment 173
Step 2: Use a Qualitative Construction Noise Assessment to Estimate Construction Noise 174
Step 3: Use a Quantitative Construction Noise Assessment to Estimate Construction Noise 174
Step 4: Assess Construction Noise Impact 178
Step 5: Determine Construction Noise Mitigation Measures 179
7.2 Construction Vibration Assessment 182
Step 1: Determine Level of Construction Vibration Assessment 182
Step 2: Use a Qualitative Construction Vibration Assessment 183
Step 3: Use a Quantitative Construction Vibration Assessment 183
Step 4: Assess Construction Vibration Impact 185
Step 5: Determine Construction Vibration Mitigation Measures 186

SECTION 8: DOCUMENTATION OF NOISE AND VIBRATION ASSESSMENT 188
8.1 Environmental Document 188
Step 1: Choose the information to include 189
Step 2: Organize information in the Environmental Document 190
8.2 Technical Report on Noise and Vibration 192

APPENDIX A GLOSSARY OF TERMS 195

APPENDIX B FUNDAMENTALS OF NOISE 200
B.1 AMPLITUDE 200
B.1.1 DECIBEL ADDITION 201
B.1.2 FREQUENCY 203
B.1.3 TIME PATTERN 205
B.1.4 NOISE METRICS 206
B.1.4.1 A-WEIGHTED SOUND LEVEL: THE BASIC NOISE UNIT 206
B.1.4.2 MAXIMUM SOUND LEVEL (L_{MAX}) DURING A SINGLE NOISE EVENT 207
B.1.4.3 SOUND EXPOSURE LEVEL (SEL): EXPOSURE FROM A SINGLE NOISE EVENT 208
B.1.4.4 EQUIVALENT SOUND LEVEL ($L_{EQ(T)}$) 210
B.1.4.5 DAY-NIGHT SOUND LEVEL (L_{DN}): 24-HOUR EXPOSURE FROM ALL EVENTS 214

APPENDIX C BACKGROUND FOR TRANSIT NOISE IMPACT CRITERIA 217
C.1 RELEVANT LITERATURE 217
C.2 BASIS FOR NOISE IMPACT CRITERIA CURVES 218
C.3 EQUATIONS FOR NOISE IMPACT CRITERIA CURVES 219

APPENDIX D CLUSTERING RECEIVERS OF INTEREST 221

APPENDIX E DETERMINING EXISTING NOISE 225

APPENDIX F COMPUTING SOURCE LEVELS FROM MEASUREMENTS 229
F.1 HIGHWAY AND RAIL VEHICLE PASSBYS 229
F.2 STATIONARY SOURCES 233
F.3 L_{MAX} FOR SINGLE TRAIN PASSBY 234

APPENDIX G NON-STANDARD MODELING PROCEDURES AND METHODOLOGY 237

SECTION 5

Transit Vibration

This section presents the basic concepts of transit ground-borne vibration, also referred throughout this manual as simple "vibration," and low-frequency groundborne-noise that sometimes results from vibration. The steps for the screening and assessing of potential vibration impacts of transit projects for FTA NEPA approval are described in the following sections.

The Source-Path-Receiver framework for ground-borne vibration for a rail system illustrated in Figure 5-1 is central to all environmental vibration studies. The train wheels rolling on the rails create vibration energy that is transmitted through the track support system into the transit structure. The vibration of the transit structure excites the adjacent ground, creating vibration waves that propagate through the ground and into nearby buildings creating ground-borne vibration effects that potentially interfere with activities. The vibrating building components may radiate sound, which this manual refers to as ground-borne noise. Airborne noise from transit sources is covered in Sections 2.3–4.5 of this manual. Ground-borne noise refers to the noise generated by ground-borne vibration.

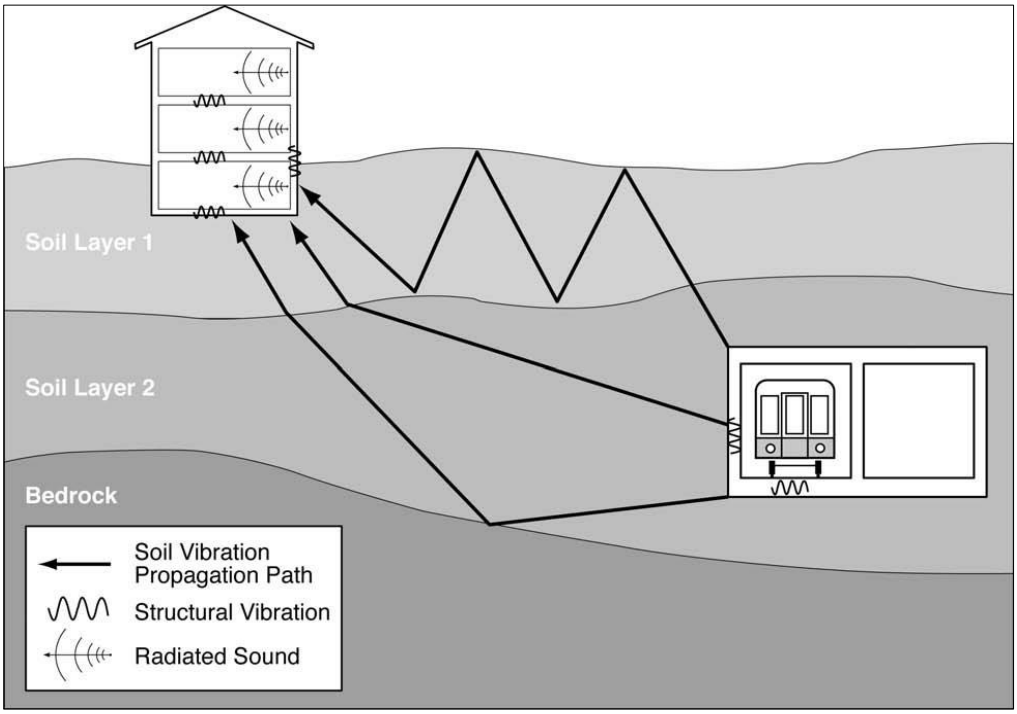


Figure 5-1 Propagation of Ground-Borne Vibration into Buildings

This section contains the following:

- Section 5.1 The ground-borne vibration and noise metrics used in this manual
- Section 5.2 An overview of transit vibration sources

- Section 5.3 An overview of transit vibration paths
- Section 5.4 An overview of receiver factors of transit vibration and a discussion of the technical background for ground-borne noise criteria

5.1 Ground-Borne Vibration and Noise Metrics

Vibration is an oscillatory motion that can be described in terms of the displacement, velocity, or acceleration. Because the motion is oscillatory, there is no net movement of the vibration element and the average of any of the motion metrics is zero. Displacement is the most intuitive metric. For a vibrating floor, the displacement is simply the distance that a point on the floor moves away from its static position. The velocity represents the instantaneous speed of the floor movement and acceleration is the rate of change of the speed.

Although displacement is easier to understand than velocity or acceleration, it is rarely used for describing ground-borne vibration. Most transducers used for measuring ground-borne vibration use either velocity or acceleration. Furthermore, the response of humans, buildings, and equipment to vibration is more accurately described using velocity or acceleration.

This manual uses the metrics outlined in Table 5-1 for transit ground-borne vibration and noise measurements, computations, and assessment. These metrics are consistent with common usage in the United States.

Table 5-1 Ground-borne Vibration and Noise Metrics

Metric	Abbreviation	Definition
Vibration Decibels	VdB	The vibration velocity level in decibel scale.
Peak Particle Velocity	PPV	The peak signal value of an oscillating vibration velocity waveform. Usually expressed in inches/second in the United States.
Root Mean Square	rms	The square root of the arithmetic average of the squared amplitude of the signal.
A-weighted Sound Level	dBA	A-weighted sound levels represent the overall noise at a receiver that is adjusted in frequency to approximate typical human hearing sensitivity. This unit is used to characterize ground-borne noise.

The metrics in the table above are illustrated in Figure 5-2. The components in the figure include:

- **Raw signal** – This curve shows the instantaneous vibration velocity, which fluctuates positively and negatively about the zero point.

- **Peak particle velocity (PPV)** – PPV is the maximum instantaneous positive or negative peak of the vibration signal. PPV is often used in monitoring of construction vibration (such as blasting) since it is related to the stresses that are experienced by buildings and is not used to evaluate human response.

- **Root mean square (rms) velocity** – Because the net average of a vibration signal is zero, the rms amplitude is used to describe smoothed vibration amplitude. The rms of a signal is the square root of the

average of the squared amplitude of the signal. The average is typically calculated over a one-second period. The rms amplitude is always less than the PPV[viii] and is always positive. The rms amplitude is used to convey the magnitude of the vibration signal felt by the human body, in inches/second.

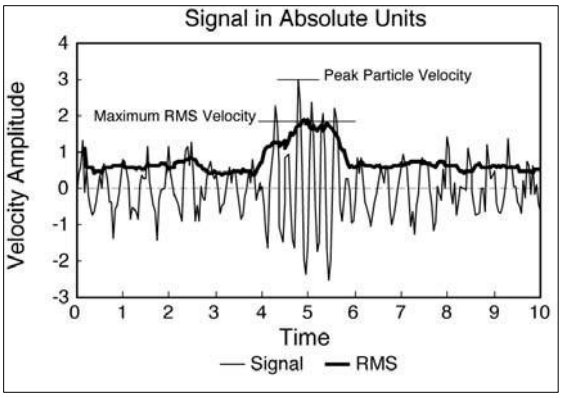


Figure 5-2 Vibration Signal in Absolute Units

The PPV and rms velocity are described in inches per second in the United States and meters per second internationally (with several different reference values). Although it is not universally accepted, vibration is commonly expressed in decibel notation. The decibel scale compresses the range of numbers required to describe vibration.

The graph in Figure 5-3 shows the rms curve from Figure 5-2 expressed in decibels.

Vibration velocity level in decibels is defined as:

$$L_v = 20 \log\left(\frac{v}{v_{ref}}\right) \qquad \textbf{Eq. 5-1}$$

where:

L_v = velocity level, VdB
v = rms velocity amplitude
v_{ref} = 1 x 10^{-6}in/sec in the USA
= 1 x 10^{-8}m/sec internationally*

*Because of the variations in the reference quantities, it is important to be clear about what reference quantity is being used when specifying velocity levels. All vibration levels in this manual are referenced to 1x10^{-6} inches/second.

[viii] The ratio of PPV to maximum rms amplitude is defined as the crest factor for the signal. The crest factor is typically greater than 1.41, although a crest factor of 8 or more is not unusual for impulsive signals. For ground-borne vibration from trains, the crest factor is usually 4 to 5.

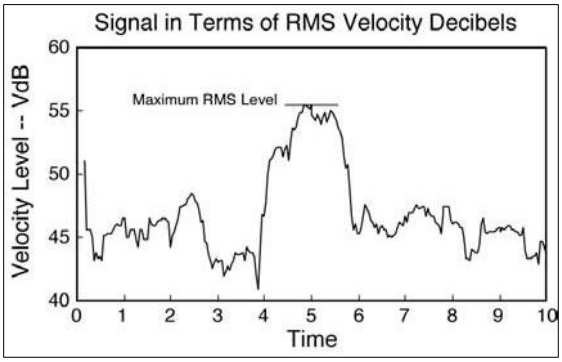


Figure 5-3 Vibration Signal in RMS Velocity Decibels

Ground-borne noise occurs when vibration radiates through a building interior and creates a low-frequency sound, often described as a rumble, as a train passes by. The annoyance potential of ground-borne noise is typically characterized with the A-weighted sound level. Although the A-weighted sound level is typically used to characterize community noise, characterizing low-frequency noise using A-weighting can be challenging because the non-linearity of human hearing causes sounds dominated by low-frequency components to seem louder than broadband sounds (sounds consisting of many frequency components, with no dominant frequencies) that have the same A-weighted level. The result is that ground-borne noise with a level of 40 dBA sounds louder than 40 dBA broadband noise. Because ground-borne noise sounds louder than broadband noise at the same noise level, the limits for ground-borne noise are lower (i.e., stricter) than would be the case for broadband noise.

5.2 Sources of Transit Ground-borne Vibration and Noise

Ground-borne vibration can be a concern for nearby neighbors of a transit system route or maintenance facility. However, in contrast to airborne noise, ground-borne vibration is not a common environmental problem. It is unusual for vibration from sources such as buses and trucks to be perceptible, even in locations close to major roads. This section discusses common sources of ground-borne vibration and noise.

Most perceptible indoor vibration is caused by sources within buildings such as operation of mechanical equipment, movement of people, or slamming of doors. Typical outdoor sources of vibration waves that propagate through the ground and create perceptible ground-borne vibration in nearby buildings include construction equipment, steel-wheeled trains, and traffic on rough roads. If the roadway is fairly smooth, the vibration from rubber-tired traffic is rarely perceptible. Building damage due to vibration is also rare for typical transportation projects; but in extreme cases, such as during blasting or pile-driving during construction, vibration could cause damage to buildings.

Figure 5-4 illustrates common vibration sources and the human and structural response to ground-borne vibration ranging from approximately 50 VdB (below

perceptibility) to 100 VdB (the threshold of potential damage). The background vibration velocity level in residential areas is usually 50 VdB or lower,[ix] and the threshold of perception for humans is approximately 65 VdB. A vibration level of 85 VdB in a residence can result in strong annoyance.

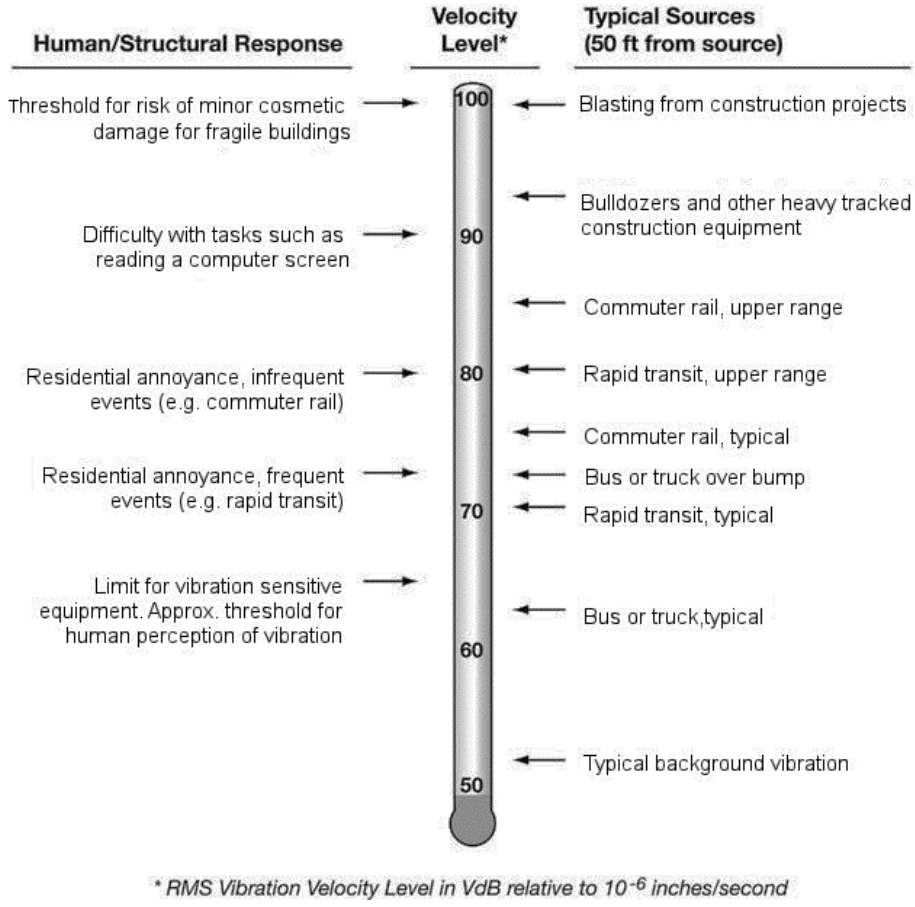


Figure 5-4 Typical Levels of Ground-Borne Vibration

Rapid transit or light rail systems typically generate vibration levels of 70 VdB or more near their tracks, while buses and trucks rarely create vibration that exceeds 70 VdB unless there are bumps due to frequent potholes in the road. Heavy locomotives on diesel commuter rail systems create vibration levels approximately 5 to 10 dB higher than rail transit vehicles.

Vibration from trains is strongly dependent on factors such as how smooth the wheels and rails are, as well as the resonance frequencies of the vehicle suspension system and the track support system. These systems, like all mechanical systems, have resonances that result in increased vibration response at certain frequencies, called natural frequencies. Unusually rough road or track, steel-wheel flats, geologic conditions that promote efficient propagation of vibration, or vehicles with very stiff suspension systems could increase typical

[ix] Background vibration is typically well below the threshold of human perception and is of concern only when the vibration affects very sensitive manufacturing or research equipment. Electron microscopes and high-resolution lithography equipment are examples of equipment that is highly sensitive to vibration.

vibration levels by approximately 10 VdB. Common factors that contribute to ground-borne vibration and noise at the source are presented in Table 5-2. These factors are discussed in more detail throughout this Section.

Table 5-2 Factors that Influence Levels of Ground-Borne Vibration and Noise at the Source

Category	Factors	Influence
Operations and Vehicles	Speed	Higher speeds result in higher vibration levels. Doubling speed results in a vibration level increase of approximately 4 to 6 dB.
	Vehicle Suspension	Stiff suspension in the vertical direction can increase the effective vibration forces. On transit cars, the primary suspension has the largest effect on vibration levels.
	Wheel Condition and Type	Wheel flats and general wheel roughness are major sources of vibration from steel wheel/steel rail systems. Resilient wheels on rail transit systems can provide some vibration reduction over solid steel wheels, but are usually too stiff to provide substantial reduction. For more information, see Section 6.4, Step 2.
Guideway	Track/Roadway Surface	Rough track or rough roads are often sources of excessive vibration. Maintaining a smooth surface will reduce vibration levels.
	Track Support System	On rail systems, the track support system is one of the major components in determining the levels of vibration. The highest vibration levels are created by track that is rigidly attached to a concrete trackbed (e.g., track on wood half-ties embedded in the concrete). The vibration levels are much lower when special vibration control track systems such as resilient fasteners, ballast mats, and floating slabs are used.
	Transit Structure	Heavier transit structures typically result in the lower vibration levels. The vibration levels from a lightweight bored tunnel will usually be higher than from a poured concrete box subway.
	Transit System Elevation	A rail system guideway will be either underground (subway), at-grade, or elevated, with substantial differences in the vibration characteristics at each elevation. ▪ Underground: vibration is typically the most important environmental factor of interest. ▪ At-grade: airborne noise is typically the dominant factor, although vibration and noise can be a problem, particularly at interior locations well isolated from exterior noise. ▪ Elevated: it is rare for vibration to be an issue with elevated railways except when guideway supports are located within 50 ft of buildings.

Brief discussions of ground-borne vibration and noise sources for different modes of transit are provided below.

At-Grade Heavy Rail and Light Rail

Ground-borne vibration and noise from urban heavy rail and LRT is common when there is less than 50 ft between the track and building foundations. Local geology and structural details of the building determine if the source of complaints is due to perceptible vibration or audible ground-borne noise. Complaints about ground-borne vibration from surface track are more common than ground-borne noise complaints. A substantial percentage of complaints about both ground-borne vibration and noise correlate with proximity of special track work, rough or corrugated track, or wheel flats. Light rail systems tend to generate fewer complaints than heavy rail due to lower operating speeds.

Commuter and Intercity Passenger Trains

There is the potential for vibration-related issues when new commuter or intercity rail passenger service (including electric multiple units (EMUs) and diesel multiple units (DMUs)) powered by either diesel or electric locomotives is introduced in an urban or suburban area. Commuter and intercity passenger trains have similar characteristics, but commuter trains typically operate on a more frequent schedule. These passenger trains often share track with freight trains, which have different vibration characteristics as discussed below.

Freight Trains

Local and long-distance freight trains are similar in that they both are diesel-powered and have the same types of cars. They differ in their overall length, number and size of locomotives, and number of heavily loaded cars. However, because locomotive suspensions are similar, the maximum vibration levels of local and long-distance freights are similar. Locomotives and rail cars with wheel flats are the sources of the highest vibration levels.

If the transit project does not in any way change the freight service, tracks, etc., then vibration from the freight line would be part of the existing conditions and need to be considered in terms of cumulative impacts (see Section 6.2, Step 3 on how to consider cumulative impacts). If the project results in changes to the freight path, operations, frequency, etc. (e.g., relocating freight tracks within the ROW to make room for the transit tracks) then those potential impacts and mitigation should be evaluated as part of the proposed project. However, note that vibration mitigation is very difficult to implement on tracks where freight trains with heavy axle loads operate.

High-Speed Passenger Trains

Passenger trains travelling at high speeds, 90 to 250 miles per hour, have the potential for creating high levels of ground-borne vibration. Ground-borne vibration should be anticipated as one of the major environmental impacts of any trains travelling at high speeds located in an urban or suburban area.[x] For projects that are specifically high-speed transportation refer to the FRA "High-Speed Ground Transportation Noise and Vibration Impact Assessment" guidance manual.[39]

AGT Systems

AGT systems include a wide range of transportation vehicles that provide local circulation in downtown areas, airports, and theme parks. Because AGT systems normally operate at low speeds, have lightweight vehicles, run on elevated structures, and rarely operate in vibration-sensitive areas, ground-borne vibration problems are very rare.

Subway and At-grade Track

While ground-borne vibration produced from trains operating subway and at-grade track have very different characteristics, they have comparable overall vibration velocity levels. Complaints about ground-borne vibration are often more common near subways than near at-grade track. This is not because

[x] Amtrak trains (branded Acela at the time of publication) on the Northeast Corridor between Boston and Washington, DC, which attain moderate to high speeds in some sections with improved track, fit into this category.

subways create higher vibration levels than at-grade systems, rather because subways are usually located in more densely developed areas in closer proximity to building foundations, and the airborne noise is usually a more serious problem for at-grade systems than the ground-borne vibration. Another difference between subway and at-grade track is that the ground-borne vibration from subways tends to be higher frequency than the vibration from at-grade track, which makes the ground-borne noise more noticeable.

Streetcars

Complaints about ground-borne vibration from street cars are uncommon given that streetcars typically operate at very low speeds (less than 25 mph).

Buses

Because the rubber tires and suspension systems of buses provide vibration isolation, it is unusual for buses to cause ground-borne vibration or noise problems. For most issues with bus-related vibration, such as rattling of windows, the cause is almost always airborne noise and directly related to running surface conditions such as potholes, bumps, expansion joints, or other discontinuities in the road surface (usually resolved by smoothing the discontinuities).

Buses operating inside buildings will likely cause vibration concerns for other building inhabitants. An example of this situation is a bus transfer station in the same building as commercial office space. Sudden loading of a building slab by a heavy moving vehicle or by vehicles running over lane divider bumps can cause intrusive building vibration.

5.3 Paths of Transit Ground-Borne Vibration and Noise

Vibration travels from the source through the transit structure and excites the adjacent ground, creating vibration waves that propagate through soil layers and rock strata to the foundations of nearby buildings. The vibration then propagates from the foundation throughout the remainder of the building structure. The vibration of the building structure and room surfaces can radiate a low-frequency rumble called ground-borne noise (Figure 5-1).

Soil and subsurface conditions are known to have a strong influence on the levels of ground-borne vibration. Among the most important factors are the stiffness and internal damping of the soil and the depth to bedrock. Vibration propagation is more efficient in stiff clay soils. Shallow rock may concentrate the vibration energy close to the surface, resulting in ground-borne vibration problems at large distances from the track. Factors such as soil layers and depth to water table can have substantial effects on the propagation of ground-borne vibration. These factors are summarized in Table 5-3.

Table 5-3 Factors that Influence Levels of Ground-borne Vibration and Noise along Path

Geology Factors	Influence
Soil type	Vibration levels are generally higher in stiff clay-type soil than in loose sandy soil.
Rock layers	Vibration levels are usually high near at-grade track when the depth to bedrock is 30 ft or less. Subways founded in rock will result in lower vibration amplitudes close to the subway. Vibration levels do not attenuate as rapidly in rock as in soil.
Soil layering	Soil layering can have a substantial effect on the vibration levels since each stratum can have considerably different dynamic characteristics.
Depth to water table	The presence of the water table may have a substantial effect on vibration, but a definite relationship has not been established.

5.4 Receiver Factors that Influence Ground-Borne Vibration and Noise

Ground-borne vibration is a concern almost exclusively inside buildings. Train vibration may be perceptible to people who are outdoors, but it is very rare for outdoor vibration to cause complaints.

The vibration levels inside a building are dependent on the vibration energy that reaches the building foundation, coupling of the building foundation to the soil, and propagation of the vibration through the building. In general, the heavier a building is, the lower the response will be to the incident vibration energy. Common factors that contribute to ground-borne vibration and noise at the receiver are presented in Table 5-4.

Table 5-4 Factors that Influence Levels of Ground-Borne Vibration and Noise at the Receiver

Receiver Building Factors	Influence
Foundation type	The heavier the building foundation, the greater the coupling loss as the vibration propagates from the ground into the building.
Building construction	Each building has different characteristics relative to structure-borne vibration, but, in general, the heavier the building, the lower the levels of vibration. The maximum vibration amplitudes of the floors and walls of a building will often occur at the resonance frequencies of the components of the building.
Acoustical absorption	The more acoustically absorptive materials in the receiver room, the lower the ground-borne noise level. Note that because ground-borne noise usually is a low-frequency phenomenon, it is affected by low-frequency absorption (e.g., below 250 Hz).

5.5 Human Response to Transit Ground-borne Vibration and Noise

This section contains an overview of human receiver response to ground-borne vibration and noise. It serves as background information for the vibration impact criteria in Section 6.2.

The effects of ground-borne vibration can include perceptible movement of floors in buildings, rattling of windows, shaking of items on shelves or hanging on walls, and low-frequency noise (ground-borne noise). Building damage is not a

factor for typical transportation projects, but in extreme cases, such as during blasting or pile-driving during construction, vibration could cause damage to buildings. Although the perceptibility threshold is approximately 65 VdB, human response to vibration is not usually substantial unless the vibration exceeds 70 VdB (Figure 5-4). A vibration level that causes annoyance is well below the damage risk threshold for typical buildings (100 VdB).

Ground-borne vibration is almost never a problem outdoors. Although the motion of the ground may be perceived, without the effects associated with the shaking of a building, the motion does not provoke the same adverse human reaction. Ground-borne noise that accompanies the building vibration is usually perceptible only inside buildings and typically is only an issue at locations with subway or tunnel operations where there is no airborne noise path or for buildings with substantial sound insulation such as a recording studio.

One of the challenges in developing suitable criteria for ground-borne vibration is that there has been relatively little research into human response to vibration and, specifically, human annoyance with building vibration. The American National Standards Institute (ANSI) developed criteria for evaluation of human exposure to vibration in buildings in 1983,[40] and the International Organization for Standardization (ISO) adopted similar criteria in 1989[41] and revised them in 2003.[42] The 2003 version of ISO 2631-2 acknowledges that "human response to vibration in buildings is very complex." It further indicates that the degree of annoyance cannot always be explained by the magnitude of the vibration alone. In some cases, complaints are associated with measured vibration that is lower than the perception threshold. Other phenomena such as ground-borne noise, rattling, visual effects such as movement of hanging objects, and time of day (e.g., late at night) all play some role in the response of individuals. To understand and evaluate human response, which is often measured by complaints, all of these related effects need to be considered.

Figure 5-5 illustrates the relationship between the vibration velocity level measured in 22 homes and the general response of the occupants to the vibration from measurements performed for several transit systems along with subjective ratings by researchers and residents. These data are published in the "State-of-the-Art Review of Ground-borne Noise and Vibration."[43] The figure also includes a curve representing the percent of people annoyed by vibration from high-speed trains from a Japanese study for comparison.[44]

Both the occupants and the people who performed the measurements agreed that floor vibration in the Distinctly Perceptible range is unacceptable for a residence. The data indicates that residential vibration exceeding 75 VdB is unacceptable for a repetitive vibration source such as rapid transit trains that pass every 5 to 15 minutes. The results from the Japanese study confirm the conclusion that at a vibration velocity level of 75 to 80 VdB, many people will find the vibration annoying. A Transportation Research Board (TRB) study of human response to vibration from 2009 also supports this finding and indicates that incidence of complaints fall rapidly with a level decreasing below 72 VdB.[42][45]

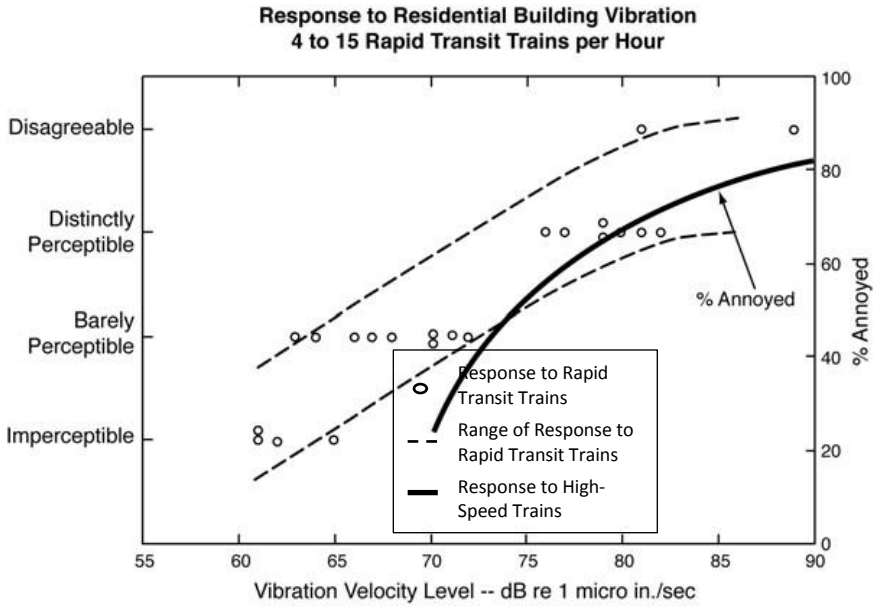


Figure 5-5 Response to Transit-Induced Residential Vibration

Table 5-5 presents the human response to different levels of ground-borne vibration and noise on which the criteria presented in Section 6.2 are based. The vibration level (VdB) is presented with the corresponding frequency assuming that the vibration spectrum peaks at 30 Hz or 60 Hz.[xi] The ground-borne noise levels (dBA) are estimated for the specified vibration velocity with a peak vibration spectrum of 30 Hz (Low Freq) and 60 Hz (Mid Freq). Note that the human response differs for vibration velocity level based on frequency. For example, the noise caused by vibrating structural components may cause annoyance even though the vibration cannot be felt. Alternatively, a low-frequency vibration can cause annoyance while the ground-borne noise level it generates does not.

[xi] The A-weighted level of ground-borne noise can be estimated by applying A-weighting to the vibration velocity spectrum and by subtracting an additional 5 dB for a room with average acoustical absorption. Since the A-weighting at 31.5 Hz is -39.4 dB, if the vibration spectrum peaks at 30 Hz, the A-weighted sound level will be approximately 40 dB lower than the velocity level. If the vibration spectrum peaks at 60 Hz, the A-weighted sound level will be approximately 25 dB lower than the velocity level.

Table 5-5 Human Response to Different Levels of Ground-Borne Vibration and Noise

Vibration Velocity Level	Noise Level		Human Response
	Low Freq*	Mid Freq**	
65 VdB	25 dBA	40 dBA	Approximate threshold of perception for many humans. Low-frequency sound: usually inaudible. Mid-frequency sound: excessive for quiet sleeping areas.
75 VdB	35 dBA	50 dBA	Approximate dividing line between barely perceptible and distinctly perceptible. Many people find transit vibration at this level annoying. Low-frequency noise: tolerable for sleeping areas. Mid-frequency noise: excessive in most quiet occupied areas.
85 VdB	45 dBA	60 dBA	Vibration tolerable only if there are an infrequent number of events per day. Low-frequency noise: excessive for sleeping areas. Mid-frequency noise: excessive even for infrequent events for some activities.

*Approximate noise level when vibration spectrum peak is near 30 Hz.
**Approximate noise level when vibration spectrum peak is near 60 Hz.