

Desarrollo de la metodología de simulación de vibraciones ambientales y fortalecimiento de los procedimientos de medición en campo y validación de datos para la empresa K2 INGENIERÍA S.A.S.

Diego Antonio Díaz Mogollón

Id. 000234029

Universidad Pontificia Bolivariana – Seccional Bucaramanga

Escuela de Ingeniería

Bucaramanga

2018

**Desarrollo de la metodología de simulación de vibraciones ambientales y ⁱⁱ
fortalecimiento de los procedimientos de medición en campo y validación de
datos para la empresa K2 INGENIERÍA SAS.**

Diego Antonio Díaz Mogollón

Id. 000234029

Proyecto de grado presentado como requisito para optar al título de:

INGENIERO MECÁNICO

Director del Proyecto

Hernández Arroyo Emil

Universidad Pontificia Bolivariana – Seccional Bucaramanga

Escuela de Ingeniería

Bucaramanga

2018

1	Capítulo Generalidades de la Empresa	4
1.1.	Nombre de la empresa	4
1.2.	Actividad económica	4
1.3.	Estructura organizacional.....	4
1.4.	Teléfono	4
1.5.	Dirección.....	5
1.6.	Reseña histórica	5
1.7.	Supervisor	5
2	Capítulo Diagnóstico de la Empresa	6
3	Capítulo Antecedentes	7
4	Capítulo Justificación.....	8
5	Capítulo Objetivos	9
5.1	Objetivo general.....	9
5.2	Objetivos específicos.	9
6	Capítulo Marco Teórico.....	10
6.1	Vibraciones.	10
6.2	Ondas Sísmicas.	10
6.2.1	Propiedades básicas de las ondas.....	10
6.2.2	Ondas internas u ondas de cuerpo.....	12
6.2.3	Ondas Superficiales.	13
6.3	Medidas de vibración.....	15
6.4	Equipos de medición de vibraciones.....	15
6.4.1	Geófonos.	15
6.4.2	Acelerómetros	16
6.5	Software de procesamiento de datos.....	17
6.5.1	Software dBTrait.....	17
6.6	Reglamentación en manejo de vibraciones.....	17
6.6.1	Reglamentación Internacional.	18
6.7	Modelos de simulación de vibraciones ambientales.....	20
6.7.1	Modelo de campo cercano.	21
6.7.2	Modelo de campo lejano.	22
6.7.3	Comparación de modelo de campo cercano y campo lejano.....	22
7	Capítulo Actividades desarrolladas.....	24
7.1	Metodología de configuración del sensor ORION.	24
7.2	Especificaciones técnicas y recomendaciones del sensor WLS.	27
7.2.1	Especificaciones Técnicas	28
7.2.2	Recomendaciones después de cada uso	28
7.2.3	Recomendaciones de carga	28
7.3	Comparación de las Normas o estándares internacionales	28
7.4	Modelo de campo lejano DEVINE.....	1
8	Capítulo Resultados.	2
8.1	Instructivo del modelo de campo lejano.	2
	Consideraciones del modelo de DEVINE.....	11
9	Capítulo Conclusiones y Recomendaciones.	12

9.1	Conclusiones	12
9.2	Recomendaciones	13
10	Lista de Referencias	14

Lista de tablas

vi

Tabla 1 Normatividad internacional en el manejo de vibraciones	18
Tabla 2 Especificaciones técnicas del sensor ORION 01dB	24
Tabla 3 Alcances y criterios ofrecidos por las Normas Internacionales.	1
Tabla 4 Recolección de datos medidos en campo	4
Tabla 5 Logaritmo de la distancia escalada y la PPV	4
Tabla 6 Confirmación de los valores de predicción al 50% y 90%.	7
Tabla 7 Modelo de predicción de vibraciones para el campo lejano al 90% de confiabilidad.	9

Ilustración 1 Estructura organizacional K2 ingeniería.....	4
Ilustración 2 Nivel de frecuencia.	11
Ilustración 3 Amplitud de onda.....	11
Ilustración 4 Onda completa de vibración.	12
Ilustración 5 Longitud de Onda.	12
Ilustración 6 Forma del movimiento de las ondas "P" y "S".	13
Ilustración 7 Ondas love.	14
Ilustración 8 Movimiento de las partículas dentro de los diferentes tipos de ondas.....	14
Ilustración 9 Aspecto geófono real y esquema de un geófono.	15
Ilustración 10 Esquema de un acelerómetro piezoeléctrico.....	16
Ilustración 11 Esquema de un acelerómetro.	16
Ilustración 12 Figura explicativa modelo Holmberg y Persson.....	21
Ilustración 13 Diferencia en la predicción de vibración del modelo de campo cercano y el modelo de campo lejano.	23
Ilustración 14 Sensor ORION 01dB	24
Ilustración 15 Afectaciones del parámetro T_i	26
Ilustración 16 Afectaciones del parámetro T_j	27
Ilustración 17. Sensor Inalámbrico Tri-Axial WLS.....	27
Ilustración 18 Grafico de dispersión al 50% de confiabilidad.....	5
Ilustración 19 modelo de campo lejano con confiabilidad del 50% y 90%.....	7
Ilustración 20 VPP para K y Ka respecto el umbral máximo de la norma DIN 4150.	8
Ilustración 21 Umbrales máximos de la norma DIN respecto la carga y la distancia.	10
Ilustración 22 Estimación de la PPV vs Carga Operante.....	10

Lista de anexos

Anexo 1 Valores guía para la velocidad de vibración debido a acontecimientos breves.	15
Anexo 2 Grafico de valores guía para la velocidad de vibración debido a acontecimientos breves.	16
Anexo 3 Valores guía para la velocidad de vibración debido a acontecimientos prolongados.	17
Anexo 4 Valores guía para la velocidad de vibración debido a acontecimientos prolongados en tuberías.	18
Anexo 5 Grafico de valores guía para la velocidad de vibración debido a vibraciones pulsadas.	19
Anexo 6 Grafico de valores guía para la velocidad de vibración debido a vibraciones continuas.	20
Anexo 7 Guía de intervalos de medición según el tipo de evento.	21

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN DE VIBRACIONES AMBIENTALES Y FORTALECIMIENTO DE LOS PROCEDIMIENTOS DE MEDICIÓN EN CAMPO Y VALIDACIÓN DE DATOS PARA LA EMPRESA K2 INGENIERÍA S.A.S.

AUTOR(ES): DIEGO ANTONIO DÍAZ MOGOLLÓN

PROGRAMA: Facultad de Ingeniería Mecánica

DIRECTOR(A): EMIL HERNÁNDEZ ARROYO

RESUMEN

Varios procesos de la actividad humana generan vibraciones ambientales las cuales de no ser monitoreadas y controladas pueden producir daños en estructuras aledañas. Para evitar afectaciones en estructuras por motivo de las vibraciones se debe evitar velocidades elevadas de propagación de ondas vibracionales. En Colombia pocas empresas prestan servicios sobresalientes en el campo de las vibraciones, debido a la falta de conocimiento en el uso de equipos de monitoreo, softwares de procesamiento de datos y no tener claro las propiedades sismo resistentes de las estructuras. El objetivo de estas prácticas es generar la metodología de simulación de vibraciones ambientales y fortalecer los procedimientos de medición en campo y validación de datos para la empresa K2 Ingeniería S.A.S con el fin de poder ofrecer a los clientes un servicio sobresaliente de consultoría y monitoreo en el campo de las vibraciones ambientales producidas por la actividad humana. El objetivo se resuelve al complementar manuales de procedimientos que se deben llevar a cabo para realizar la configuración de los equipos y sensores encargados de la medición de las ondas vibracionales, donde los manuales describan las afectaciones que produce cada configuración en el procesamiento de datos. Con base a buenos monitoreos se debe implementar el uso y cumplimiento de umbrales internacionales para las propiedades sismo resistentes de las estructuras y al desarrollo de metodologías de simulación de vibraciones presentadas en el campo lejano por motivos de voladuras.

PALABRAS CLAVE:

Vibraciones, Monitoreos, Modelo de campo lejano, sensores, voladuras.

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: DEVELOPMENT OF THE METHODOLOGY OF SIMULATION OF ENVIRONMENTAL VIBRATIONS AND STRENGTHENING OF THE PROCEDURES OF MEASUREMENT IN FIELD AND VALIDATION OF DATA FOR THE COMPANY K2 INGENIERÍA S.A.S.

AUTHOR(S): DIEGO ANTONIO DÍAZ MOGOLLÓN

FACULTY: Facultad de Ingeniería Mecánica

DIRECTOR: EMIL HERNÁNDEZ ARROYO

ABSTRACT

Several processes of human activity generate environmental vibrations which, if not monitored and controlled, can cause damage to nearby structures. To avoid damage to structures due to vibrations, high velocities of vibrational wave propagation should be avoided. In Colombia, few companies provide outstanding services in the field of vibrations, due to the lack of knowledge in the use of monitoring equipment, data processing software and not being clear about the earthquake resistant properties of the structures. The objective of these practices is to generate the methodology of simulation of environmental vibrations and strengthen the procedures of field measurement and data validation for the company K2 Ingeniería S.A.S. in order to be able to offer clients an outstanding consulting and monitoring service in the field of environmental vibrations produced by human activity. The objective is to complement the manuals of procedures that must be carried out to carry out the configuration of the equipment and sensors responsible for the measurement of vibrational waves, where the manuals describe the affectations that each configuration produces in the data processing. Based on good monitoring, the use and compliance of international thresholds for the earthquake resistant properties of the structures and the development of simulation methodologies of vibrations presented in the far field for blasting reasons must be implemented.

KEYWORDS:

Vibrations, Monitoring, measurements of far-field, blasting, sensors.

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

Introducción

En la actualidad muchos procesos de la actividad humana generan vibraciones como por ejemplo el tráfico vehicular, férreo, aéreo, al igual que el producido por maquinaria de construcción, voladuras, entre muchos otros. En nuestro país gran parte de las empresas que generan dichas vibraciones tienen que afrontar demandas y protestas por parte de la población que se encuentra cerca de esas fuentes debido a daños presentados en las edificaciones aledañas y a molestias en las personas al percibir los eventos. Debido a los daños materiales y molestias humanas ocasionadas se han desarrollado en los países más avanzados normas que especifican métodos para medir y evaluar los efectos de las vibraciones respecto a los tipos de edificaciones presentes en sus respectivas zonas.

Para saber cómo medir, apreciar y mitigar los daños generados por las vibraciones se debe conocer que estas son producidas por la liberación de energía de cualquier tipo de fuente, la liberación de energía genera una serie de ondas de esfuerzo que se desplazan por la corteza terrestre y ondas de choque generadas en el aire (Iriarte & Fernando , 2010) Durante su desplazamiento las ondas mueven las partículas del medio que recorren produciendo sobre estas velocidades, desplazamientos y aceleraciones que se pueden registrar en diferentes dispositivos como geófonos o transductores, que con ayuda de softwares son indispensables para apreciar características primordiales de las vibraciones.

En el transcurrir de los años se han desarrollados normas las cuales establecen principios para llevar a cabo una buena medición de las vibraciones y su posterior análisis al igual que implementan valores guía que representan cotas máximas a las características de las ondas para diferentes tipos de estructura con el fin de evitar daños en las edificaciones y afectaciones a las personas al mantener márgenes de seguridad.

Una de las fuentes generadoras de vibraciones más controladas son las voladuras para las cuales se han desarrollado modelos con el fin de prever el nivel de vibración que ocasionaría cada voladura teniendo en cuenta parámetros como la carga de explosivo, la distancia al punto de monitoreo, entre otros, y de esta manera poder ver hasta que nivel de vibración se podrá generar sin provocar daños según los niveles máximos establecidos en las normas.

1 Capítulo

Generalidades de la Empresa

1.1.Nombre de la empresa

K2 Ingeniería SAS

1.2.Actividad económica

K2 INGENIERÍA SAS es una empresa que presta servicios de consultoría ambiental, comercialización y distribución de equipos ambientales, medición de ruido, vibración y calidad de aire, muestreo de aguas y fuentes fijas.

1.3.Estructura organizacional

La Ilustración 1 representa la estructura organizacional de la división de ingeniería de la empresa K2 INGENIERÍA SAS.

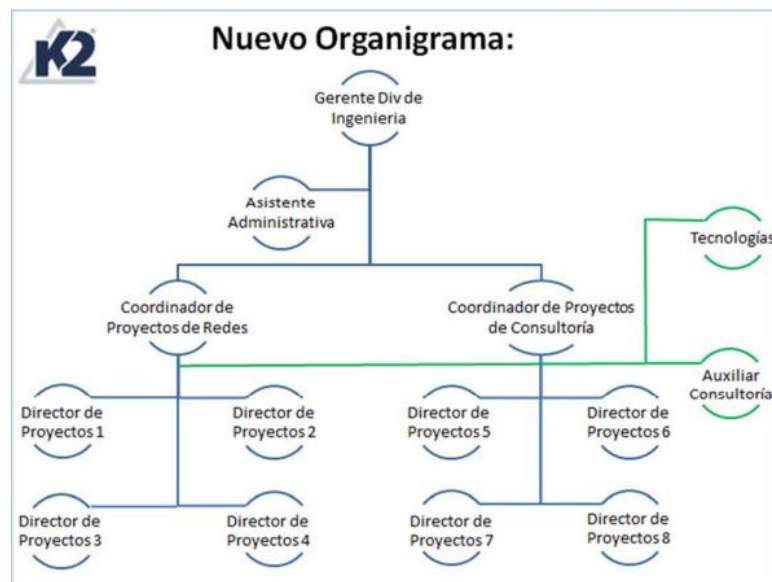


Ilustración 1 Estructura organizacional K2 ingeniería.

Fuente. K2 Ingeniería. Corporativo.

1.4.Teléfono

+57 (7) 6176472

+57 (7) 6352870

1.5.Dirección

Sede principal
Bucaramanga
Carrera 36 No. 36-26/28

1.6.Reseña histórica

K2 Ingeniería es una empresa colombiana constituida en 1999, que integra la experiencia en diferentes áreas de ingeniería ambiental, civil, mecánica, electrónica y sistemas para ofrecer un amplio portafolio de servicios de consultoría, monitoreo e integración de tecnologías. K2 Ingeniería, se ha especializado en el área ambiental, sector en el que desarrolla proyectos sobresalientes a nivel nacional.

1.7.Supervisor

El supervisor de K2 Ingeniería es el profesional Jorge Leonardo Gutiérrez Ramírez ingeniero ambiental y sanitario con especialización en gestión ambiental desempeña el cargo de ingeniero consultor para la división de consultoría e ingeniería. Actualmente ocupa el cargo de coordinador de proyectos relacionados en materia de calidad del aire, ruido, vibración y agua.

2 Capítulo

Diagnóstico de la Empresa

K2 Ingeniería es una empresa que integra experiencia en diferentes áreas de ingeniería para ofrecer un amplio portafolio de servicios de consultoría especializada, integración de tecnologías y monitoreos de variables ambientales. Lo que permite ofrecer a sus clientes las herramientas necesarias para realizar la medición de sus impactos ambientales para el cumplimiento de requerimientos normativos.

K2 Ingeniería es reconocida a nivel Suramérica por la ejecución de proyectos en las áreas de consultoría ambiental en calidad del aire, ruido, hidrometeorológica y calidad del agua. Al igual que ha desarrollado proyectos de gran importancia en el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible- MADS, Fondo Financiero de Proyectos Sostenibles- FONADE, Argos, Cemex, Indumil, Termopaipa, entre otras 600 empresas.

Actualmente no se ha podido prestar de manera sobresaliente los servicios de consultoría, integración de tecnologías y monitoreos en el campo de vibraciones ambientales, debido a falta de experiencia y conocimiento en esta área. Es por ello que se hace necesario un apoyo en los temas de simulación de vibraciones ambientales y un fortalecimiento de procedimientos de medición en campo al igual que su respectiva validación de datos.

3 Capítulo

Antecedentes

Las vibraciones generadas por la actividad humana, en cualquier origen como tráfico de ferrocarril, vehicular o maquinarias de construcción como las provenientes de tronaduras; inducen esfuerzos dinámicos en las edificaciones que pueden causar deformaciones y consecuentemente daños (Carlos Scherpenisse, 2008), por lo cual se ha recurrido a implementar métodos de medición al igual que se han generado normas que especifican valores máximos a dichas vibraciones.

Según José Alejandro Duque (Ramírez, 2013) en la actualidad se dispone principalmente de un método cuantitativo para analizar el comportamiento estructural de las edificaciones sometidas a vibraciones y consiste en desarrollar mediciones en campo bajo condiciones reales por medio de la instalación de un sistema de instrumentación para obtener la respuesta de una edificación a cualquier tipo de excitación dinámica, la mayor parte de investigación en este tema se centra en analizar las vibraciones ambientales de las edificaciones, las cuales permiten de cierta manera obtener parámetros dinámicos de las estructuras con cierta confiabilidad y a un costo relativamente bajo en comparación a la implementación de instrumentación en las construcciones que se encarguen de cierta manera de prevenir que los movimientos ondulatorios lleguen a las edificaciones y evitar que estos resulten afectados.

En una investigación realizada sobre la problemática ambiental de vibraciones por tronaduras Guillermo Silva (Silva, 2008) logro apreciar que la problemática ambiental no está limitada a operaciones de canteras con poblados adyacentes, sino que también incluye faenas mineras alejadas de los mismos, donde las vibraciones, onda aérea y proyecciones de roca pueden generar daño a infraestructura interna y molestias a personas.

En el desarrollo de la tesis de Fredy Cruzado y Kevien Díaz (Fredy Cruzado, 2017) implementaron para la empresa Minera Cerro Negro S.A. en Cajamarca un modelo en el cual daban a conocer la máxima carga operante para obtener un nivel de vibración a campo lejano dentro de los parámetros establecidos por la normatividad internacional.

4 Capítulo

Justificación

La práctica empresarial pretende fortalecer los procedimientos de medición en campo y la validación de los datos, donde se logre establecer de manera técnica el mejor método que se debe llevar a cabo para una correcta captación de datos y su posterior análisis y evaluación de resultados, con los cuales se ofrezca a los clientes un informe detallado de las vibraciones ocasionadas y si fuera el caso de los límites superados que pueden ocasionar daños según las normas establecidas. También se busca desarrollar una metodología de simulación de vibraciones ambientales, la cual la empresa K2 ingeniería en sus procesos de consultoría pueda ofrecer a sus clientes, un sistema de predicción que presente los límites de las variables en los procesos generadores de vibraciones dentro de los parámetros normativos, con el fin de evitar daños en estructuras por los eventos producidos.

5 Capítulo

Objetivos

5.1 Objetivo general.

Generar la metodología de simulación de vibraciones ambientales y fortalecer los procedimientos de medición en campo y validación de datos para la empresa K2 Ingeniería S.A.S.

5.2 Objetivos específicos.

- Realizar la consulta de estudios y estándares nacionales e internacionales diferentes a las normas DIN.
- Analizar y entender los principios de operación de los equipos y software de medición de vibraciones ambientales de la empresa K2 Ingeniería.
- Consultar estudios internacionales sobre simulación de vibraciones ambientales, haciendo énfasis en el modelo de campo lejano para implementar un procedimiento de simulación.

6 Capítulo

Marco Teórico

6.1 Vibraciones.

“La vibración se refiere a cambios alternativos de forma en un cuerpo, de modo que sus puntos oscilen sincrónicamente en torno a posiciones de equilibrio” (ECI, 2012). Se entiende por vibración al fenómeno de transmisión de energía en un medio el cual ocasiona un movimiento ondulatorio. La vibración ocurre mediante el paso de fases alternativas de tensión y compresión.

Las vibraciones causadas por los procesos de la actividad humana pueden ocasionar daños desde estructurales a superficiales en las edificaciones; en la mayoría de los casos tales vibraciones son generadas por voladuras, maquinaria de construcción y tráfico vehicular o férreo.

En el caso de las voladuras, las vibraciones son producidas en el frente de detonación y se propaga por el terreno adyacente debido a las ondas que se generan en el interior del taladro, estas ondas se producen a causa de que en esta zona el explosivo sólido es convertido en gas, y la densidad del gas es aun igual a la densidad del explosivo sólido.

6.2 Ondas Sísmicas.

Una deformación que viaja a través de un medio elástico se llama onda elástica; y cuando el medio a través del cual se desplaza es la Tierra, se llama onda sísmica (Nava, 1998). Las ondas sísmicas se pueden clasificar, con base en su origen en natural o artificiales. Estas se definen como la propagación de perturbaciones en un medio, y son producidas cuando ocurre una liberación de energía. Independiente de su origen se dividen en tres tipos básicos donde solo dos se propagan en todas las direcciones en el interior de la tierra por lo que son llamadas ondas internas y las que no se transmiten en todas las direcciones son denominadas ondas superficiales.

6.2.1 Propiedades básicas de las ondas.

En general las ondas poseen cinco propiedades básicas las cuales se nombran y definen a continuación.

- A. Frecuencia** – La frecuencia de vibración se refiere al número de veces por segundo que la onda de propagación realiza un ciclo completo, la Ilustración 2 muestra un ejemplo entre baja frecuencia y alta frecuencia.

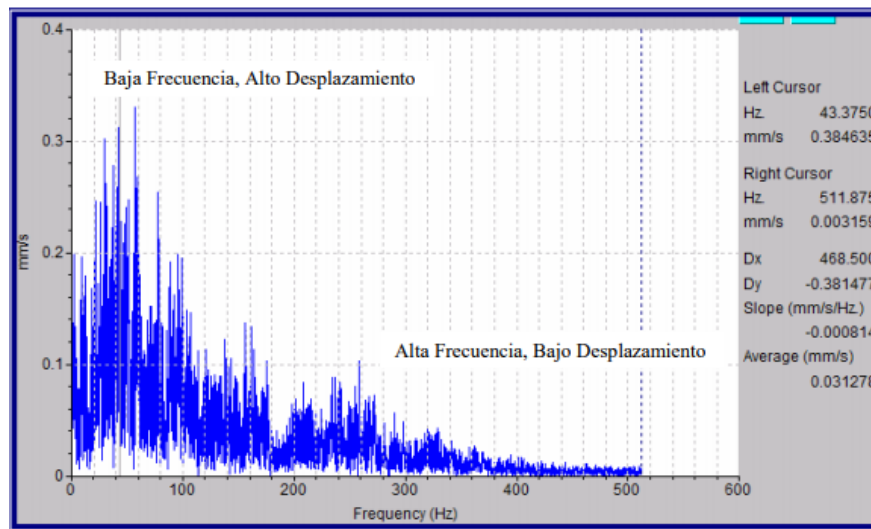


Ilustración 2 Nivel de frecuencia.

Nota. Fuente: extraída de (Perez, 2009)

- B. Amplitud** – Es el máximo desplazamiento desde la posición de reposo de una partícula del terreno, donde medida la velocidad de dicho desplazamiento, es universalmente considerada la mejor variable utilizada para la medición de las vibraciones y para la predicción de los efectos causados por las voladuras. En la Ilustración 3 se puede apreciar la amplitud de una onda.

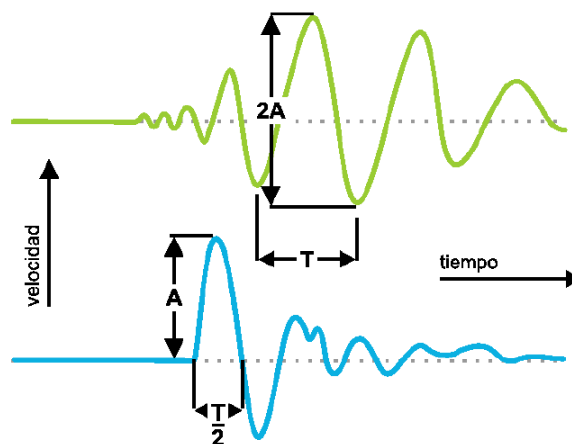


Ilustración 3 Amplitud de onda.

Nota. Fuente: (K2 Ingeniería, 2017)

- C. Duración** – Es el tiempo total que el medio está expuesto a la vibración. La Ilustración 4 muestra una onda completa de vibración.

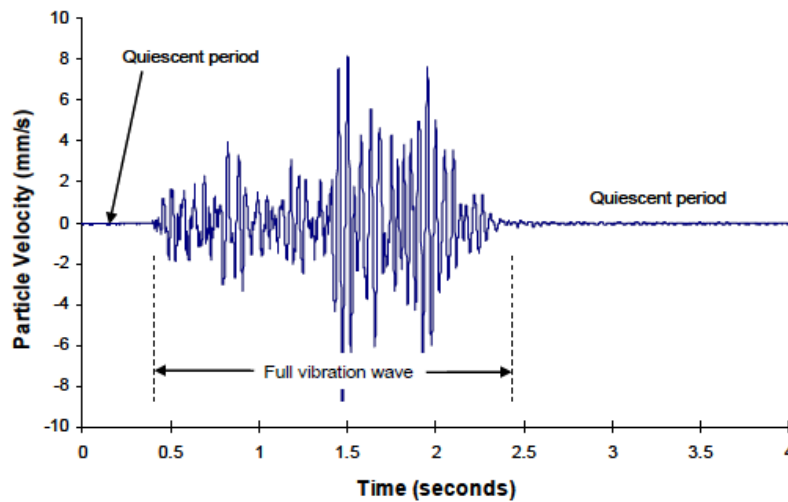


Ilustración 4 Onda completa de vibración.

Nota. Fuente: (Cintex, 2006).

- D. Longitud de Onda** – Hace referencia a la distancia que viaja la onda en un ciclo completo. Es decir que tienen la misma elongación en todo momento como se demuestra en la Ilustración 5.

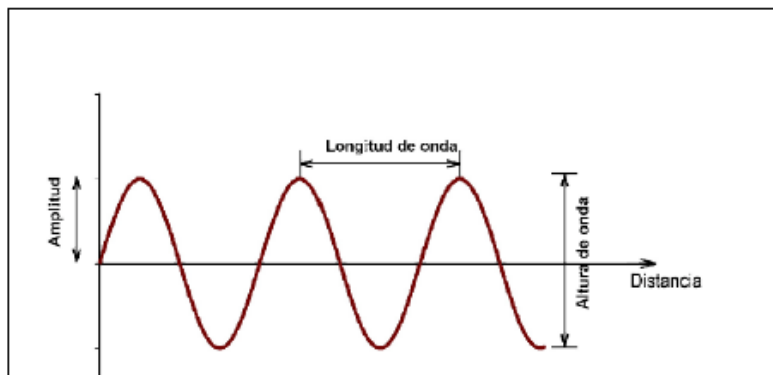


Ilustración 5 Longitud de Onda.

Nota. Fuente: (Cintex, 2006).

- E. Velocidad de Propagación** – La velocidad de propagación describe la velocidad con la cual la onda se desplaza a través de la roca siendo esta velocidad dependiente de las propiedades del medio.

6.2.2 Ondas internas u ondas de cuerpo.

Según (Nava, 1998) la teoría de la elasticidad dice que son posibles dos tipos de ondas elásticas que viajan a través de la Tierra, y que son conocidas como ondas de cuerpo u ondas internas, las cuales pueden ser de compresión (Ondas “P”) o de cizalla (Ondas

“S”). Las ondas sísmicas se consideran de alta o baja frecuencia (o de periodo largo o corto) según las componentes que predominen en su espectro.

6.2.2.1 Ondas primarias “P” o de compresión.

Estas ondas se propagan dentro de los materiales, produciendo alternativamente compresiones y rarefacciones en el medio y dando lugar a un movimiento de las partículas en la dirección de propagación de las ondas (IGME, 1987). Estas ondas son las que se propaga más rápido y, por lo tanto, es la primera en llegar a cualquier punto, en ser sentida y en ser registrada. También producen cambios de volumen, pero no de forma en el material a través del que se propagan. En la Ilustración 6 e Ilustración 8 se aprecia de forma gráfica la representación de la propagación de la onda primaria “P” donde se demarca gráficamente la compresión y dilatación en el medio.

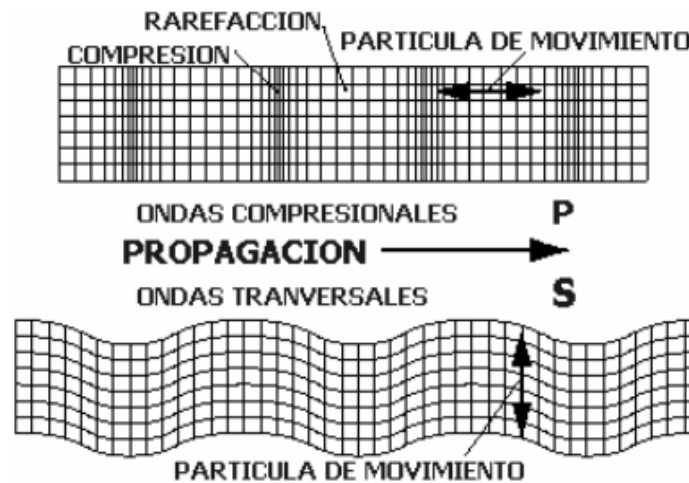


Ilustración 6 Forma del movimiento de las ondas "P" y "S".

Nota. Fuente: Análisis Estructural II. UTN.

6.2.2.2 Ondas secundarias u ondas “S”.

Las ondas “S” también conocidas como ondas transversales o de cizalla, son aquellas en las cuales las partículas del medio se desplazan perpendicularmente a la dirección de propagación. Las ondas “S” son más lentas que las ondas “P” pero por su particular movimiento de arriba hacia abajo sacude el medio de propagación como se observa en la Ilustración 6 e Ilustración 8. Esta forma de propagación logra considerar dicha onda más perjudicial en comparación de las ondas “P”.

6.2.3 Ondas Superficiales.

Las ondas de tipo superficial se dividen en dos categorías: las ondas de Rayleigh y las ondas de Love.

6.2.3.1 Ondas de Rayleigh “R”

Este tipo de onda son las más lentas e imprimen a las partículas un movimiento según una trayectoria elíptica, con un sentido contrario al de propagación de la onda (IGME, 1987). Cuando se presentan con periodos muy largos se debe a la intercesión entre las ondas “P” y la componente vertical de las ondas “S”. El movimiento de la onda Rayleigh se puede apreciar en la Ilustración 8.

6.2.3.2 Ondas de Love “L”

Se comportan de manera muy parecida a la descrita para las ondas de Rayleigh, pero se deben a interferencia constructiva de ondas “S” solamente, por lo que no pueden existir en un semiespacio, sino que requieren al menos una capa sobre un semiespacio, donde pueda quedar atrapada parte de la energía sísmica. Estas más rápidas que las Rayleigh, dan lugar a un movimiento de partículas en direcciones transversales a la de propagación como se observa en la Ilustración 7 e Ilustración 8.

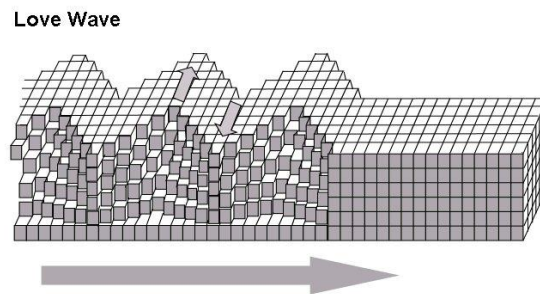


Ilustración 7 Ondas love.

Nota. Fuente: Control de vibraciones para las casas de tierra en Perú.

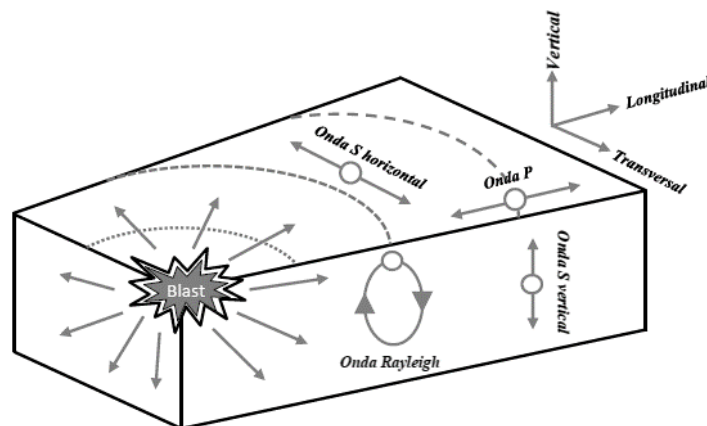


Ilustración 8 Movimiento de las partículas dentro de los diferentes tipos de ondas.

Nota. Fuente: Predicción de la ley de atenuación ESIM.

6.3 Medidas de vibración.

Es preciso hacer una distinción entre dos aspectos bien diferentes del fenómeno de la vibración los cuales son la velocidad de onda y la velocidad de partícula. La velocidad de onda es aquella con la que la vibración se propaga por un medio y la velocidad de partícula es aquella relativa a las oscilaciones que experimenta la partícula excitada, por el paso de la onda de energía vibratoria.

Una partícula sometida a una vibración, experimenta un movimiento ondulatorio del que sus parámetros medibles pueden ser la frecuencia, el desplazamiento, la velocidad y la aceleración. De todos los parámetros posibles de medición, la velocidad de vibración es la que mejor representa el nivel de vibración y los daños que se producen en las edificaciones. Sin embargo, para establecer un criterio fiable, se debe tener en cuenta la frecuencia dominante de la vibración.

6.4 Equipos de medición de vibraciones.

Para captar las oscilaciones presentes en el terreno generadas por un evento se emplean equipos de medida denominados sismógrafos. Un equipo de medida completo consta de:

- Uno o varios transductores los cuales son los elementos encargados de captar vibraciones presentes en el terreno transformándolas en impulsos eléctricos (geófonos, acelerómetros).
- Equipo de adquisición encargado de amplificar o atenuar la señal y posteriormente grabarla.
- Algunos modelos incorporan sistema de impresión o sistema de visualización en pantalla remota utilizando un dispositivo conectado a la interfaz del equipo.

6.4.1 Geófonos.

Los geófonos son transductores electromagnéticos que emiten una tensión eléctrica proporcional a la velocidad de partícula de la onda vibracional. Esta tensión es producida por una bobina móvil ubicada dentro del campo producido por un imán fijo (Cereceda, 2015). Los geófonos operan sobre su frecuencia natural, lo que indica que el voltaje inducido es proporcional a la velocidad relativa del imán a la bobina. La Ilustración 9 muestra el aspecto físico real y el esquema de un geófono.

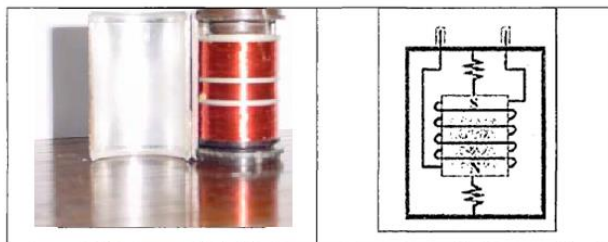


Ilustración 9 Aspecto geófono real y esquema de un geófono.

Nota. Fuente: Arequipa, Analisis de vibracion y calculo del modelo de atenuacion Unidad Minera Uchucchacua (2015).

6.4.2 Acelerómetros

Los acelerómetros se basan en el cambio de ciertas propiedades físicas de algunas sustancias cuando son sometidas a esfuerzos de presión y se caracterizan por dar respuesta tanto a altas como a bajas frecuencias.

Los acelerómetros piezoeléctricos consisten en un material de cuarzo o algunos cerámicos (materiales cristalinos) en el que el esfuerzo de presión producido por el movimiento brusco del terreno, causa un cambio en la estructura cristalina y así cambia la intensidad de los impulsos eléctricos. La Ilustración 10 muestra el esquema de un acelerómetro piezoeléctrico.

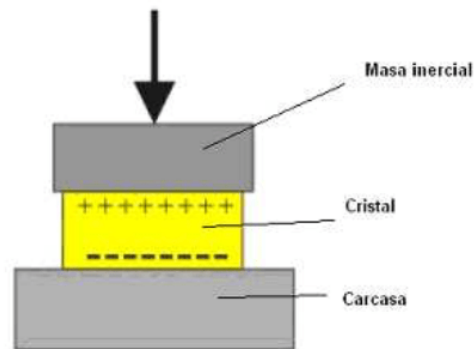


Ilustración 10 Esquema de un acelerómetro piezoeléctrico.

Nota. Fuente: Sevilla, Diseño Integrado, Universidad de Sevilla.

A diferencia de los acelerómetros piezoeléctricos, los acelerómetros piezoresistivos utilizan un sustrato en vez de un cristal piezoeléctrico, en esta tecnología las fuerzas que ejerce la masa sobre el sustrato varían su resistencia, que forma parte de un circuito que mediante un puente de Whetstone mide la intensidad de la corriente (US, 2008). La ventaja de esta tecnología respecto a la piezoeléctrica es que puede medir aceleraciones hasta cero Hz de frecuencia. En la Ilustración 11 se pueden apreciar las componentes de un acelerómetro.

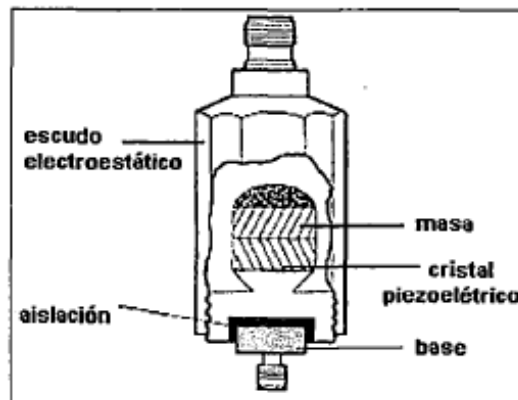


Ilustración 11 Esquema de un acelerómetro.

Nota. Fuente: Arequipa, Analisis de vibracion y calculo del modelo de atenuacion Unidad Minera Uchucchacua (2015).

6.5 Software de procesamiento de datos

Los softwares de procesamiento de datos implementados en este campo han sido desarrollados debido a la necesidad de realizar análisis de los datos medidos tales como la frecuencia, comparación de umbrales normativos y curvas límite al igual que el desarrollo de informes específicos de las mediciones.

6.5.1 Software dBTrait

El software dBTrait ha sido desarrollado para el proceso de medición de datos de vibraciones y ruido ambiental. Es capaz de procesar los datos registrados de la nueva generación de instrumentos tales como los DUO de 01Db, FUSION, CUBE, ORION, WLS.

A partir de los datos registrados dBTrait ofrece potentes funcionalidades de procesamiento tales como un historial de tiempo de una cantidad determinada, historial de tiempo de una banda de frecuencia del espectro seleccionado y asociado de cálculos estadísticos, análisis de frecuencia, historial de tiempo de frecuencia dominante para vibraciones en el medio ambiente, la comparación de umbrales normativos y curvas límite, informes de medición, entre otros análisis de gran relevancia en el área de medición de ruido.

Una de las ventajas del software dBTrait es la disposición de las normativas de la legislación francesa e internacional lo cual facilita la comparación de los datos obtenidos con los umbrales permitidos por las dichas normativas siendo esto de gran ayuda para la interpretación de los datos que exceden los límites permitidos y poder buscar alternativas que prevengan ese tipo de vibraciones.

6.6 Reglamentación en manejo de vibraciones.

Con el aumento de las fuentes generadoras de vibración, se hace necesario el desarrollo de cotas máximas a los niveles de vibración con el fin de evitar daños en las edificaciones. los valores máximos establecidos se han basado en reconocimientos de daños en momentos de medición, incluyendo ciertos márgenes de seguridad que son en muchos casos parte de una legislación o normatividad técnica.

El daño se presenta debido a que las vibraciones inducen esfuerzos dinámicos que generan deformaciones temporales en los elementos constructivos de las edificaciones. En el caso idealizado de una onda plana en un medio elástico infinito el esfuerzo esta dado por la Ecuación (1).

$$\sigma = \frac{\dot{u}E}{c} \quad (1)$$

Siendo σ el esfuerzo, $\dot{u}$ la velocidad de partícula, E el módulo de elasticidad y c la velocidad de propagación de la onda sísmica (Benjumea, 2003). En consecuencia, para un tipo de terreno con propiedades específicas conocidas al igual que para una edificación con características determinadas (velocidad de propagación y módulo de elasticidad constante), la velocidad de vibración de partícula es la variable que define el valor del esfuerzo, que en consecuencia es el causante del daño en las estructuras. Lo que conlleva a que todas las normas y recomendaciones relativas al daño ocasionado por las fuentes generadoras de vibraciones utilicen la velocidad de vibración de partícula como la variable básica y principal a medir.

Por otro lado, la magnitud de la deformación generada en las estructuras también depende del comportamiento dinámico de estas, y en particular de la frecuencia de resonancia o capacidad de respuesta de la estructura en general y de cada elemento que la compone. Por esto, la frecuencia de la vibración incidente es la segunda variable básica en la evaluación del potencial de daño.

Hoy en día el control de los efectos adversos de vibración causados por los diferentes procesos de la actividad humana, se logra mediante el acatamiento de los niveles sugeridos en las normas específicas, así como mediante el buen procedimiento y manejo de los procesos causantes de las vibraciones.

6.6.1 Reglamentación Internacional.

Las normas internacionales más relevantes en el manejo de vibraciones son las mostradas en la Tabla 1.

Tabla 1 Normatividad internacional en el manejo de vibraciones

País de procedencia	Nombre de reglamentación	Fecha de expedición
Alemania	DIN 4150-3	1999
Internacional	ISO 4866	1990
Francia	Circulaire du 23/07/86	1986
Francia	arrêté 22/09/94	1994

Fuente: Elaboración propia.

6.6.1.1 Internacional- ISO 4866

La ISO, Organización Internacional para la Estandarización, por medio del comité técnico de vibraciones mecánicas y de choque crearon el estándar ISO 4866: “Mechanical vibration and shock – Vibration of buildings – Guidelines for the measurement and evaluation of their effects on buildings” en 1990.

En si, la ISO 4866 no presenta valores indicativos de vibraciones, debido a que esta fue creada para establecer principios básicos de medición y procesamiento de señales, con el fin de evaluar los efectos de las vibraciones en estructuras.

La medición de niveles de vibración según este estándar tiene como propósitos: 1) reconocimiento de problemas donde se reporte vibraciones en edificaciones, que causen consternación en los ocupantes y sea necesario evaluar niveles que garanticen la integridad estructural, 2) monitoreo de control donde niveles de vibración máximos permitidos han sido establecidos por alguna agencia y requieran se reportados, 3) Documentación de cargas dinámicas que hayan sido consideradas en el diseño estructural, donde se realizan mediciones para verificar la predicción y reajustar parámetros en nuevos diseños.

6.6.1.2 Alemania – DIN 4150-3

El instituto de Normalización Alemana o DIN (Deutsches Institut für Normung) ha publicado varios criterios de niveles máximos de vibración, el criterio 4150-3 fue expedido en 1999.

La norma DIN especifica un método para medir y evaluar los efectos de las vibraciones en estructuras diseñadas principalmente para cargas estáticas al igual que proporciona valores guía donde dicha norma establece que al cumplirse no dará lugar a daños que tengan un efecto adverso sobre la capacidad de servicio de las estructuras.

La norma se encuentra dividida en dos categorías según el tipo de fuente, dividiéndose en vibraciones breves o de corta duración o en vibraciones prolongadas, además de clasificar el tipo de edificaciones en tres categorías para las cuales desarrolla una línea de umbral para cada una denominadas de la siguiente manera:

- Línea 1: Edificios utilizados con fines comerciales, edificios industriales y edificios de diseño similar
- Línea 2: Viviendas y edificios de diseño y/o ocupaciones similares.
- Línea 3: Estructuras que, debido a su particular sensibilidad a la vibración, no pueden clasificarse bajo las líneas 1 y 2 y son de gran valor intrínseco (por ejemplo, edificios bajo orden de conservación).

Donde para cada categoría indica valores guía de la velocidad máxima siendo estas también relacionadas con diferentes rangos de frecuencia.

6.6.1.3 Circulaire du 23/07/86

La circular publicada el 22 de octubre de 1986 en Francia relativa a las vibraciones mecánicas emitidas al medio ambiente por instalaciones clasificadas para la protección del medio ambiente tiene dos propósitos principales los cuales el primero es especificar la

información fundamental relativa a los fenómenos de las vibraciones mecánicas y el segundo establecer los estándares para la emisión de vibraciones mecánicas a cumplir y la metodología para evaluar los efectos sobre el medio ambiente.

El principal estándar establecido dentro de la circular basa en valores límites de velocidad de partícula versus la frecuencia observada, donde hacen referencia a los valores por debajo de los cuales las probabilidades de afectación en las construcciones son prácticamente insignificantes en la frecuencia considerada.

Los valores límite de la velocidad se dividen en dos dependiendo el tipo de vibración registrada: primero para vibraciones continuas o equivalentes que son las fuentes que emiten pulsos a intervalos relativamente cortos sin limitar el número de emisiones y segundo para las vibraciones pulsadas repetidas las cuales se presentan con espacios entre impulsos mayores a un segundo y emisiones limitadas.

6.6.1.4 Arrêté 22/09/94

Este es en realidad un decreto francés que hace énfasis en las operaciones de cantera y en las instalaciones de procesamiento de materiales para cantera. Este decreto se encuentra dividido en cinco capítulos donde se explica desde los arreglos preliminares y la conducta que se debe llevar en la zona minera hasta los registros que se deben seguir para evitar la contaminación.

En esta descripción del decreto se hace énfasis en el control de las vibraciones por medio de mediciones, debido a que se prevé en el presente estudio evitar daños en las edificaciones por los efectos de las ondas producidas.

Se determina por el decreto que las operaciones llevadas a cabo no deben dar lugar a vibraciones mecánicas que puedan comprometer la salud o la seguridad de las zonas aledañas o ser un obstáculo para su tranquilidad, por lo cual especifica que la fuente no puede generar en las construcciones vecinas velocidades de partícula ponderadas superiores a 10 mm/s medidos a lo largo de los tres ejes principales de la construcción.

6.7 Modelos de simulación de vibraciones ambientales.

Uno de los objetivos principales en los procesos de simulación de vibraciones ambientales causadas por la actividad humana, específicamente en las operaciones de voladuras, es el de poder predecir a través de un modelo las consecuencias que se producen al utilizar ciertos parámetros cambiables y relevantes, sin necesidad de tener que realizarse a escala real. Los modelos buscan predecir los niveles de vibración en un punto específico de acuerdo a un diseño de voladura hallando el valor de la velocidad de partícula en función del explosivo detonado y la distancia a la que se registra dicha detonación. Los modelos de simulación de vibraciones se encuentran divididos en dos

grupos, el primero es el modelo de campo cercano y el segundo es el modelo de campo lejano.

6.7.1 Modelo de campo cercano.

El modelo de campo cercano, se lleva a cabo cuando las vibraciones afectan directamente a las estructuras alrededor del taladro, usándose principalmente para medir el nivel de vibración que afecta la estabilidad del tajo. En el campo cercano las características de las columnas explosivas poseen gran influencia en los resultados por lo cual Holmberg & Persson desarrollaron un modelo en el cual la ecuación que predice la velocidad pico de partícula incluye parámetros exhaustivos como la longitud de la columna explosiva, la concentración lineal de carga, entre otros, los cuales se pueden apreciar en la Ecuación (2) con su respectiva explicación de los términos en la Ilustración 12.

$$PPV = k * \left(\frac{\gamma}{r_0}\right)^{\alpha} \left[\phi + \arctan\left(\frac{r_0 * \tan\phi - H}{r_0}\right) \right]^{\alpha} \quad (2)$$

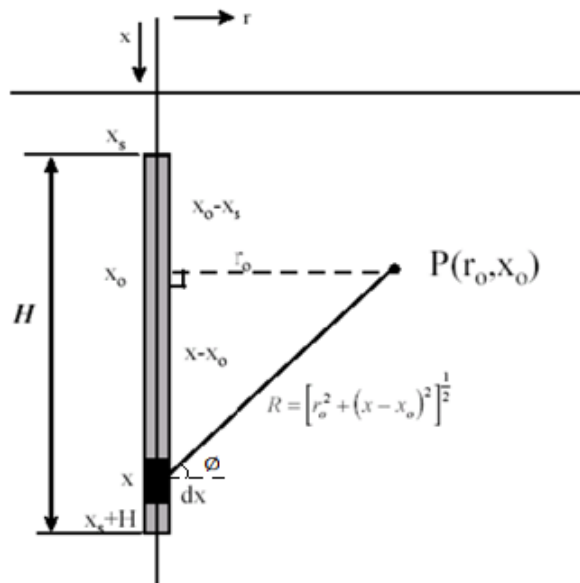


Ilustración 12 Figura explicativa modelo Holmberg y Persson.

Nota. Fuente: (Cintex, Manual de monitoreo de vibraciones generadas por tronaduras, Analisis y modelamiento ,2006).

Donde:

- K: Factor controlado principalmente por el Explosivo, (Densidad del explosivo, cantidad de carga, el número de taladros, etc.)
- α : Factor de atenuación de la roca, (Características geológicas, litológicas, estructura del macizo por donde se transmite la onda)
- γ : Carga lineal cargada en el hoyo (Kg/m)

6.7.2 Modelo de campo lejano.

Los modelos de vibración que permiten predecir el nivel de vibración por medio de la velocidad pico de la partícula son determinados a partir de mediciones de vibraciones en el terreno de manera previa, debido a que se debe obtener principalmente los siguientes tres antecedentes:

- El nivel de vibración que genera una carga de explosivo.
- La carga de explosivo utilizada para generar dicho nivel de vibración, y
- La distancia desde la carga hasta el punto al cual se midió el nivel de vibración generado.

“Teóricamente, el criterio que mejor representa el comportamiento de la vibración generadas por el tipo de cargas explosivas usadas en voladuras de tajo abierto, es el modelo de campo lejano de DEVINE puesto que, al utilizar cargas explosivas con geometría cilíndricas, se tiene que las distancias deben ser corregidas por la raíz cuadrada de la carga”. (Cintex, 2006)

El valor de la velocidad pico de partícula PPV está dado por la Ecuación (3).

$$PPV = K * \left(\frac{d}{W^{1/2}} \right)^{\alpha} \quad (3)$$

Donde:

- PPV: Velocidad Pico de Partícula (mm/s)
- W: Peso de la carga explosiva detonada en un instante (Kg)
- d: Distancia entre el punto de medición y la carga explosiva detonando
- K: Factor controlado principalmente por el Explosivo, (Densidad del explosivo, cantidad de carga, el número de taladros, etc.)
- α : Factor de atenuación de la roca, (Características geológicas, litológicas, estructura del macizo por donde se transmite la onda).

6.7.3 Comparación de modelo de campo cercano y campo lejano.

Para el modelamiento en el campo cercano se requiere de datos vibracionales adquiridos lo más cerca posible a una carga explosiva típica, lo que hace necesario de dispositivos de medición con altos rangos dinámicos de respuesta, y capaces de percibir niveles más elevados de vibración, lo que incrementa por una parte los costos de monitoreo debido a que en muchos casos no es posible la recuperación de los sensores.

Por otra parte, cuando se llevan a analizar los datos se deben ajustar al modelo cercano propuesto por Holmberg & Persson, el cual considera la carga explosiva de forma distribuida, siendo de especial importancia aspectos como la longitud, largo del taco, densidad lineal del explosivo, entre otros aspectos.

A diferencia del modelo de campo lejano propuesto por Devine que utiliza una sola distancia para el total de la carga explosiva, es decir concentra la suma de las cargas en un solo punto, siendo esta una consideración válida para distancias de más de 2 ó 3 veces la longitud de la carga explosiva. En la Ilustración 13 se observa la diferencia entre los dos modelos, especialmente en la zona más cercana a la carga, donde se aprecia como el modelo de Devine sobrevalora la velocidad de partícula, pero de igual manera se puede observar que al aumentar la distancia este modelo es más ajustado que el de campo cercano.

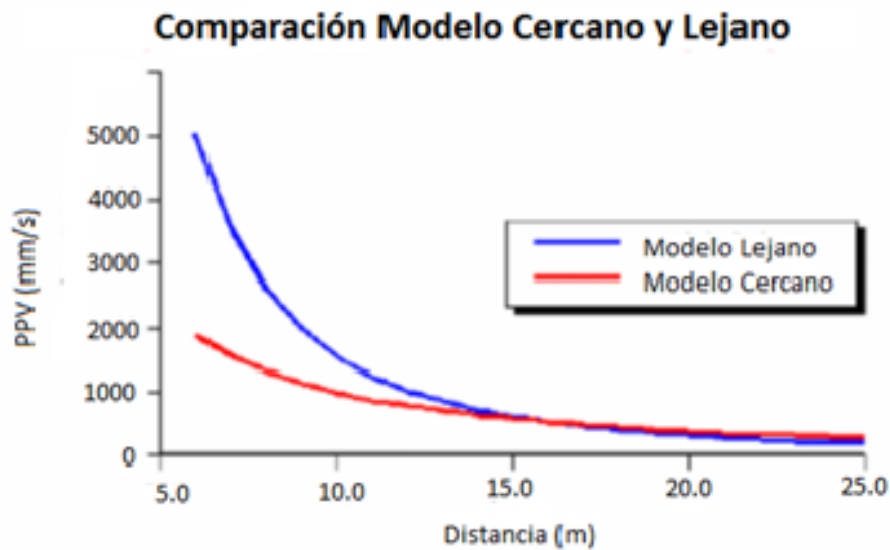


Ilustración 13 Diferencia en la predicción de vibración del modelo de campo cercano y el modelo de campo lejano.

Nota. Fuente: (Cintex, Manual de monitoreo de vibraciones generadas por tronaduras, Analisis y modelamiento ,2006)

7 Capítulo

Actividades desarrolladas

7.1 Metodología de configuración del sensor ORION.

La empresa K2 Ingeniería para las labores de medición de vibraciones tiene a disposición equipos ORION 01dB los cuales son instrumentos de medición de nueva generación que integran los instrumentos requeridos para conformar un equipo de medición completo, compuesto por un transductor (acelerómetro triaxial), equipo de adquisición y grabación de datos, al igual que ofrece un sistema para visualización en pantalla remota. Las características técnicas del sensor se pueden apreciar en la Tabla 2 y su apariencia física en la Ilustración 14.



Ilustración 14 Sensor ORION 01dB

Nota. Fuente: Manual del usuario ORION.

Tabla 2 Especificaciones técnicas del sensor ORION 01dB

Especificaciones Técnicas	
Tipo de sensor	Triaxial Piezoeléctrico
Sensibilidad típica	500 mV/g
Respuesta de frecuencia	0.4 – 1600Hz ± 10%
Rango de velocidad	0.1 mm/s – 100 mm/s
Rango de aceleración pico	2 mm/s ² – 100 mm/s ²
Rango de operación de temperatura	-10° +55°C desconectado
Rango de operación de temperatura	-10° +36°C cargando
Altitud	Hasta 2000 m

Nota. Fuente: Elaboración propia.

La programación de los parámetros de los sistemas de monitoreo de vibraciones es un factor esencial para la captación de datos exactos y coherentes al momento de la

medición y para permitir una buena interpretación de resultados, por lo cual se ha desarrollado una metodología que implemente el paso a paso de los principales parámetros que se deben configurar en el sensor ORION (01db).

Las configuraciones que se le deben realizar al sensor ORION inician con una división de información en la cual se inicia definiendo el nombre del directorio utilizado para almacenar las sesiones de medición seguido de introducir más detalles relativos a la sesión actual de ubicación.

Este avanzado sensor cuenta con una pantalla de información la cual enlista todos los eventos ocurridos en el sensor y los divide en tres niveles representados por colores: rojo para los eventos críticos, anaranjado para las advertencias del sistema y verde para los eventos informativos.

En la división de tiempo real el sistema ofrece una zona interactiva de la tabla de datos donde muestra las mediciones en el momento de manera representativa en dos gráficas, en las cuales una muestra todos los eventos a medida que transcurre el tiempo y la otra representa los valores pico ocurridos comparados con los niveles máximos autorizados según la norma establecida.

En el sensor se debe seleccionar las configuraciones de medición la cual posee otras sub-divisiones, una de las cuales es la llamada “almacenar” donde aparecen las cinco normas internacionales más relevantes en el campo de la medición con opción de cambiar los parámetros establecidos y de escoger los tipos de acelerómetros que desea utilizar, el tipo de edificación que desea medir y la ubicación del sensor en la edificación. Estas configuraciones son importantes para definir la línea de referencia debido a que según la norma escogida y los parámetros establecidos la línea guía puede ser más permisible a eventos o menos permisible. Otra sub-división es la denominada “parámetros” donde se configura de manera técnica los periodos de grabación que se requieren al igual que el rango mínimo de velocidad pico y de kurtosis que se quiera tomar en cuenta. Estos parámetros se encargan de la información mostrada en el procesamiento de los datos ofreciendo mayor información de datos para analizar.

El sensor ofrece la opción de recibir mensajes de texto en el teléfono celular enviados directamente desde el sensor con el tipo de alertas escogido, al igual que es posible activar un temporizador en el equipo donde se configura si la grabación de datos se quiere que sea inmediata, diferida o periódica del cual se configura el número de periodos y las horas de inicio.

De manera más exhaustiva permite la relación con otros equipos para captar más parámetros ambientales como lo puede ser el audio o vibraciones en otros puntos. El dispositivo ofrece para configuraciones de audio los mismos parámetros de temporizador y para acelerómetros captadores de vibraciones que solo perciban señales en un solo eje,

permite configurarlo para que a la hora de realizar el procesamiento de datos no se presenten errores.

El ORION permite establecer parámetros generales como los son: día y hora, zona horaria, sincronización horaria de GPS, sincronización horaria de NTP, servidor NTP, lenguaje, unidades métricas, máxima desviación de posición y número de teléfono para las alarmas.

La guía de configuraciones completa hace parte de los documentos de la empresa K2 ingeniería donde actualmente se utiliza para labores de medición en campo.

El sensor ORION permite la grabación simultanea de dos periodos, el primero es el periodo T_i el cual permite intervalos de grabación cortos los cuales son de 1,2 y 5 segundos y el segundo periodo de grabación es el T_j el cual permite intervalos de 5,10 y 30 segundos siendo estos un poco más extensos.

En la Ilustración 15 se puede observar una comparación entre mediciones similares, pero con diferentes intervalos de medición T_i , donde se puede apreciar diferencia en la información suministrada sobre los picos de la velocidad de la partícula. Siendo el $T_i = 1$ segundo el que detalla más información.

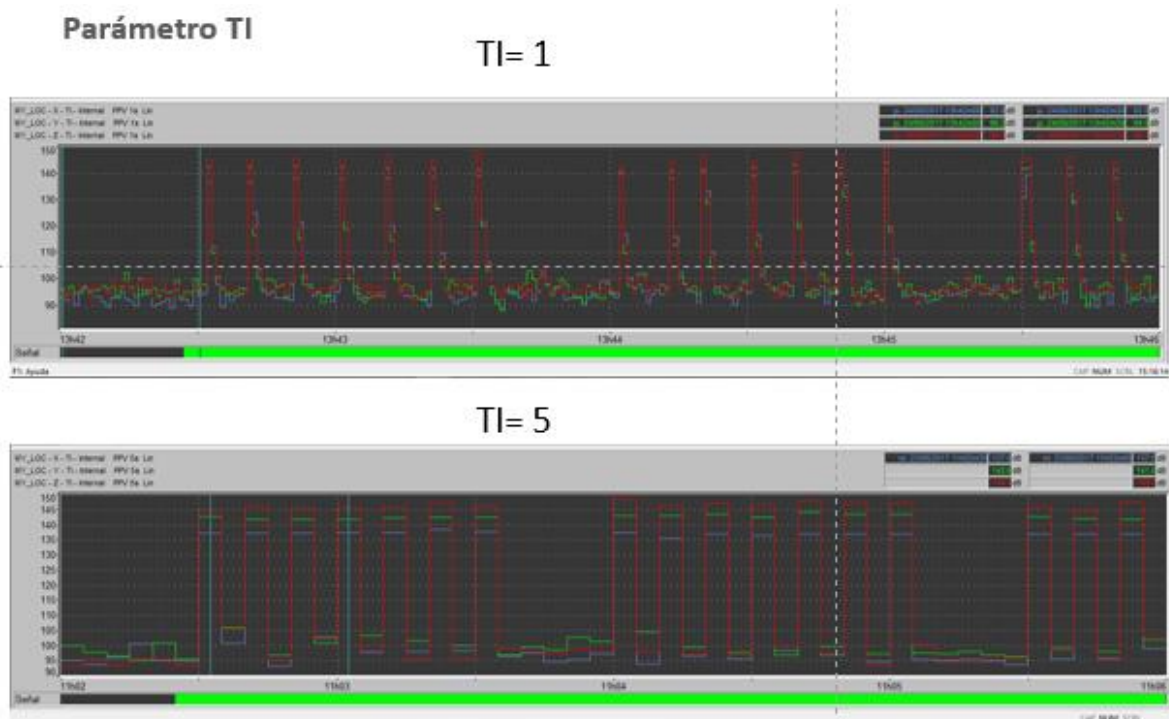


Ilustración 15 Afectaciones del parámetro T_i .

Nota. Fuente: Elaboración propia por medio del software dBTrait.

De igual manera se realizó una comparación cambiando los parámetros T_j en la Ilustración 16 la cual logra mostrar que para $T_j = 30$ segundos se tiene información acumulada lo cual facilita el análisis general de la velocidad pico de partícula y su respectiva frecuencia dominante.

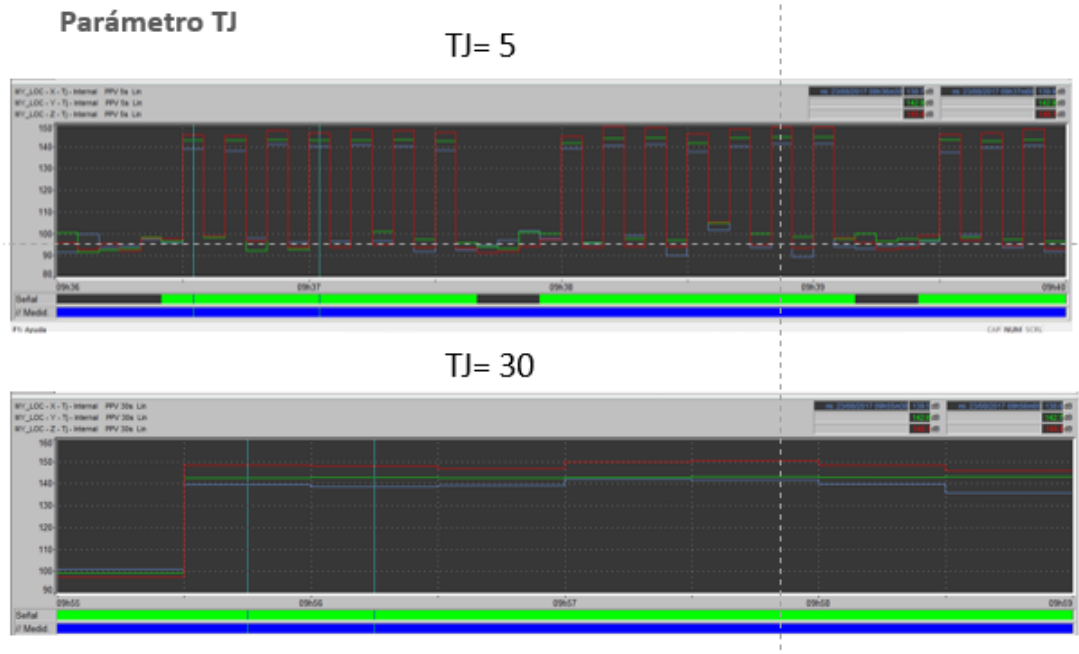


Ilustración 16 Afectaciones del parámetro T_j .

Nota. Referencia: Elaboración propia por medio del software dBTrait.

7.2 Especificaciones técnicas y recomendaciones del sensor WLS.



Ilustración 17. Sensor Inalámbrico Tri-Axial WLS.

Nota. Fuente: Manual del usuario WLS.

7.2.1 Especificaciones Técnicas

Tipo de sensor	Tri-Axial Piezoeléctrico
Rango de temperatura en proceso	+5° +40°C
Rango de temperatura ambiente	-10° +60°C
Humedad	95% sin condensación
Altitud	Hasta 2000 m

Si la temperatura de la superficie donde se establece el sensor es mayor a 60° C y menor que 80° C, la medición es posible a condición de que se limitara a dos minutos, cumplidos los dos minutos se debe retirar y dejar enfriar.

7.2.2 Recomendaciones después de cada uso

- Compruebe el estado general del WLS y sus accesorios.
 - Compruebe que las viviendas no estén agrietadas o anormalmente distorsionadas.
- Conexiones eléctricas:

7.2.3 Recomendaciones de carga

- No exceda la capacidad máxima en el conector USB, teniendo en cuenta lo siguiente:

Fuente de alimentación= 5 V DC 1A

- El proceso de carga no deberá realizarse en un ambiente con una temperatura superior a los 35°C.

7.3 Comparación de las Normas o estándares internacionales

Debido a las necesidades de la empresa K2 Ingeniería se desarrolló una tabla señalando los alcances y criterios que ofrece cada norma, con el fin de ser tomadas en su mayoría en cuenta en el momento que se realicen mediciones y debido a que las necesidades de los clientes no son las mismas, tener la posibilidad de ofrecer cualesquiera de las normas predeterminadas por el dispositivo de medición ORION 01Db.

La Tabla 3 desarrollada da claridad de las diferencias e igualdades entre las normas para cada parámetro de igual forma que se puede apreciar la manera en que se complementan algunas de ellas.

Tabla 3 Alcances y criterios ofrecidos por las Normas Internacionales.

	Norma DIN 4150	ISO 4866 de 2010	Circulaire du 23/07/86	arrêté 22/09/94
Alcance de la norma	Proporciona valores de guía que, cuando se cumplen, no darán lugar a daños que tengan un efecto adverso sobre la capacidad de servicio de la estructura.	Establece principios para llevar a cabo la medición de vibraciones.	Establecer los estándares para la emisión de vibraciones mecánicas a cumplir y la metodología para evaluar los efectos sobre el medio ambiente.	Esta norma en su mayoría hace referencia a los procesos de extracción de materias prima de las minas.
Instrumentación.	No se especifican.	-Transductores -Equipos de acondicionamiento de señal -Sistema de grabación de datos	No se especifican	No se especifican
Valores máximos guía para la velocidad de vibración	Esta norma divide sus valores máximos guía en dos tipos: -Vibraciones breves o de baja duración donde plantea una tabla con los respectivos valores y su respectiva grafica los cuales están adjuntos en el Anexo 1 Anexo 2 respectivamente. - Vibraciones prolongadas, de igual manera se muestran los valores guía planteados en el Anexo 3.	No se especifican	Al igual que la norma DIN esta también se divide en dos tipos: -Vibraciones pulsadas, el cual dispone de una gráfica de referencia que se encuentra en el Anexo 5 -Vibraciones continuas, de igual manera la norma presenta una gráfica con valores guía la cual fue agregada en el Anexo 6	Se especifica que ningún evento de ninguna fuente deberá causar vibraciones que puedan dar lugar a velocidades de partícula ponderadas superiores a 10 mm/s en construcciones medidas a lo largo de los tres ejes de construcción.
Parámetros de medición	-El captador se ubicará en la planta baja de la estructura. -En los sitios sin sótano, el punto de medición no deberá estar a más de 0,5m sobre el suelo. -Los puntos de medición estarán preferiblemente en el lado de la estructura que se expone a la fuente de excitación.	-Mediciones en o cerca de la cimentación -Se pueden seleccionar varios componentes de medida en las esquinas de la cimentación. -Cuando una estructura tenga más de 10 metros de longitud, se deberán añadir puntos de medición en las posiciones intermedias. -Es más realista orientar los	-Para las construcciones con una planta baja y no más de tres plantas (o alrededor de 12 metros), las mediciones deben hacerse por lo menos entre dos puntos (superior e inferior del edificio). -Ningún punto de los niveles considerados de medición deben estar a más de 10 metros de otro punto de medición.	Se debe tener en cuenta la norma Circulaire du 23/07/86

		sensores a lo largo de los ejes principales y menores de la estructura.	-Los sensores deben estar orientados a lo largo de los ejes del edificio, independientemente de la fuente con respecto a las construcciones.	
Parámetros de medición en pisos altos	Los captadores para medición en los pisos más altos se colocarán sobre o inmediatamente después de la mampostería estructural.	Cuando una estructura sea más alta de 12 metros, se deben utilizar puntos de medición adicionales cada 12 metros o en el piso más alto de la estructura.	Para los edificios que tienen más de tres etapas y la planta baja, se lleva a cabo una serie de grabaciones por lo menos cada cuatro etapas (o unos 12 metros), además de una serie de registros en la parte superior del edificio.	Se debe tener en cuenta la norma Circulaire du 23/07/86
Parámetros de medición en tuberías	Los captadores se colocarán sobre los tubos siempre que sea posible. Como alternativa, el captador puede colocarse sobre la superficie del suelo directamente encima del tubo, aunque en este caso, sólo es posible hacer estimaciones. Los valores guía se encuentran en el Anexo 4	No se especifican	No se especifican	No se especifican
Duración de medición	No se especifican.	Esta norma presenta una tabla donde especifica intervalos de medición teniendo en cuenta varios parámetros. La tabla se puede observar en el Anexo 7	No se especifican	No se especifican
Parámetros de acoplamiento.	No se especifican.	-El montaje del transductor puede fijarse al bastidor de la estructura mediante pernos de expansión. -Las mediciones en pisos con revestimientos flexibles tienden a dar resultados distorsionados y deben evitarse.	-Se debe tener cuidado de no instalar los sensores en los revestimientos (zinc, yeso, entre otros.) -Evitar la instalación de sensores en los balcones, entrada o escaleras. donde es posible registrar sólo los modos propios de vibración de estos elementos.	Se debe tener en cuenta la norma Circulaire du 23/07/86

Nota. Fuente: Elaboración propia.

7.4 Modelo de campo lejano DEVINE.

Debido a que no fue posible durante los seis meses de práctica el desarrollo de monitoreos de vibraciones ocasionadas por voladuras por parte de la empresa K2 Ingeniería, se desarrolló un instructivo de simulación basado en una investigación realizada por (Fredy Cruzado, 2017) del cual se tomaron los datos de medición de dicha investigación con los cuales se desarrolló dicho instructivo el cual sirva de apoyo para la empresa en el momento que vayan a implementar el modelo, de tal manera que solo necesiten seguirlo e ingresar los datos propios de medición y el modelo se encargue de actualizar las respectivas simulaciones.

El modelo de campo lejano escogido para desarrollar el instructivo es el modelo de DEVINE, debido a que se requiere hacer énfasis en los daños que pueden ocasionar las vibraciones producidas por voladura a las edificaciones aledañas a las áreas de explotación, pero no dentro de esas áreas, como se ha mencionado, los modelos de campo cercano se enfocan en los daños que se pueden ocasionar directamente alrededor del taladro.

8 Capítulo

Resultados.

8.1 Instructivo del modelo de campo lejano.

Este instructivo del modelo fue desarrollado para cargas explosivas con geometría cilíndrica, debido a que la explotación minera que se pretende monitorear en la empresa K2 Ingeniería maneja cargas cilíndricas por lo cual se puede observar que en la ecuación (4) la carga ha sido corregida por la raíz cuadrada, a diferencia de cómo se debe plantear para geometrías esféricas corregidas por la raíz cubica.

$$PPV = K * \left(\frac{d}{W^{1/2}} \right)^{\alpha} \quad (4)$$

Dónde:

- PPV: Velocidad Pico de Partícula (mm/s)
- W: Peso de la carga explosiva detonada en un instante (Kg)
- d: Distancia entre el punto de medición y la carga explosiva detonando
- K: Factor controlado principalmente por el Explosivo, (Densidad del explosivo, cantidad de carga, el número de taladros, etc.)
- α : Factor de atenuación de la roca, (Características geológicas, litológicas, estructura del macizo por donde se transmite la onda).

Para simplificar la ecuación anterior se llama a la distancia sobre la raíz de la carga como la distancia escalada (De), la cual se apreciar en la ecuación (5).

$$De = \left(\frac{d}{W^{1/2}} \right) \quad (5)$$

Para determinar los valores de α y K, el modelo de campo lejano se ajusta a una ecuación lineal mediante logaritmos, estos valores se procesan en un gráfico de dispersión en EXCEL como se irá mostrando a lo largo del instructivo de manera detallada de forma clara y concisa.

Para definir el nivel de vibración se debe tener en cuenta que los sismógrafos contienen tres Geófonos, los cuales montados adecuadamente registran las tres ondas: vertical, radial y transversal. Cada una de estas tres componentes del movimiento de la tierra tendrá una velocidad pico partícula (VPP) o máxima amplitud de la onda. La velocidad pico de partícula que se considera es la de mayor valor, es decir, el pico puede ocurrir en cualesquiera de las tres ondas, por lo que es importante considerar también que el Vector Resultante no debe ser confundido con la velocidad pico de la partícula.

Remplazando la distancia escalada en la Ecuación (5) se obtiene lo siguiente:

$$PPV = K * (De)^a$$

Luego se aplica logaritmo al modelo con el fin de ser ajustado a la forma de una ecuación lineal:

$$\text{LogPPV} = \text{Log}(K * (De)^a)$$

$$\text{LogPPV} = \text{Log}K + a \text{Log} (De)$$

Estos valores se ajustan a una ecuación lineal, obteniendo:

$$y = A + Bx$$

Siendo:

- $y = \text{LogPPV}$ Logaritmo de la PPV
 - $A = \text{Log}K$ Intercepción con el eje Y
 - $B = a$ Pendiente de la recta
 - $x = De$ Distancia Escalada
1. El primer paso es monitorear las vibraciones ocasionadas por una serie de voladuras donde se registre la distancia, carga operante, PPV. En la Tabla 4 se muestran los datos tomados de la investigación realizada por (Fredy Cruzado, 2017) con fines únicos de desarrollar el presente instructivo.
- **Distancia:** Se refiere a la distancia en metros desde el punto donde fue ubicado el explosivo, hasta punto en el cual se instaló el sensor de medición.
 - **Carga operante:** Es la cantidad de explosivo detonado pesada en kilogramos, teniendo en cuenta que, si la voladura fue ocasionada por más de un taladro la carga operante debe ser la suma de todos los taladros.
 - **PPV:** la Velocidad Pico de Partícula (PPV) debe tener gran cuidado al momento de ser seleccionada, debido a que los sensores registran tres velocidades de onda (vertical, radial y transversal) y cada una de estas tres componentes tendrá una VPP. La VPP que se considera es la de mayor valor, es decir, el pico puede ocurrir en cualesquiera de las tres direcciones.

Tabla 4 Recolección de datos medidos en campo

PRUEBA #	DISTANCIA (m)	CARGA OPERANTE (Kg)	PPV (mm/s)
1	1015,00	684,00	1,10
2	980,00	684,00	1,00
3	845,00	777,00	2,50
4	823,00	777,00	1,50
5	902,00	777,00	1,80
6	725,00	864,00	2,70
7	1086,00	693,00	1,30
8	977,00	777,00	1,10
9	926,00	777,00	1,20
10	836,00	777,00	1,80

Nota. Fuente: Extraída de (Fredy Cruzado, 2017).

- Después de registrar los datos monitoreas se debe calcular la distancia escalada seguido de aplicar logaritmo al igual que aplicarle logaritmo a la PPV. La Tabla 5 muestran los resultados hallados.

Tabla 5 Logaritmo de la distancia escalada y la PPV

PRUEBA #	De	PPV (mm/s)	Log [De] (x)	Log [PPV] (y)
1	38,81	1,10	1,59	0,04
2	37,47	1,00	1,57	0,00
3	30,31	2,50	1,48	0,40
4	29,52	1,50	1,47	0,18
5	32,36	1,80	1,51	0,26
6	24,67	2,70	1,39	0,43
7	41,25	1,30	1,62	0,11
8	35,05	1,10	1,54	0,04
9	33,22	1,20	1,52	0,08
10	29,99	1,80	1,48	0,26

Nota. Fuente: Elaboración Propia.

- Seguido de aplicar logaritmo a los datos se deben ajustar los valores a una ecuación lineal como ya fue expresado de manera que se pueda generar una gráfica de dispersión con el fin de determinar los valores del factor controlado principalmente por el explosivo (K) y el factor de atenuación de la roca (α). La Ilustración 18 muestra el grafico de dispersión.

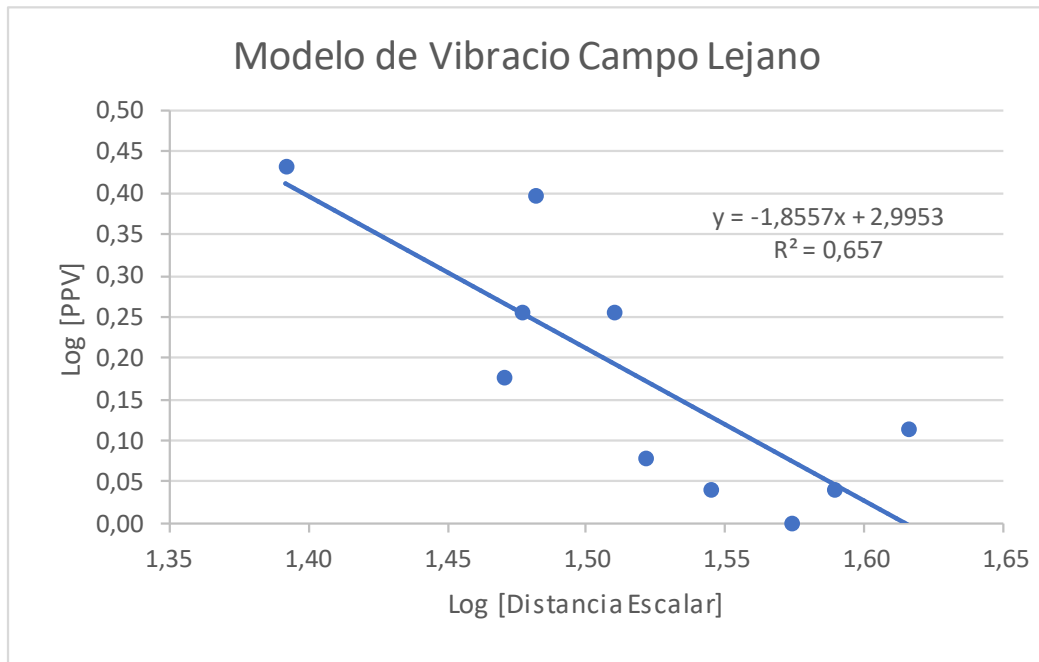


Ilustración 18 Grafico de dispersión al 50% de confiabilidad.

Nota. Elaboración Propia.

Con ayuda del grafico de dispersión se obtienen los valores de la siguiente ecuación lineal

$$y = -1,8557x + 2,9953$$

Al ser remplazados en la ecuación se obtiene:

$$\text{Log (PPV)} = 2,9953 - 1,8557 \text{ Log (De)}$$

Por lo tanto:

$$\text{Log K} = 2,9953$$

$$K = \text{Antilog (2,9953)} = 989,1398$$

$$\alpha = -1,8557$$

$$PPV = 989,1398 * \left(\frac{d}{W^{1/2}}\right)^{-1,8557}$$

Los valores hallados de K y α son promedios debido a que la ecuación de la línea corresponde a una línea de tendencia que determina una confiabilidad del 50%. En el modelo de campo lejano se obtienen diferentes valores para el coeficiente K, este

depende de la confiabilidad del modelo la cual entre mayor sea el porcentaje de confiabilidad menor serán los datos que superen los límites de la predicción. El ajuste en el modelo es realizado principalmente cuando se desean hacer predicciones de los niveles máximos de vibración, debido a que si el modelo es correcto las mediciones que se registren deberán estar por debajo del valor predicho. Debido a que se hace preferible un modelo con alta confiabilidad, pero teniendo en cuenta que no es adecuada una sobreestimación de la carga máxima que se puede utilizar se recomienda que sea del 80% al 95%. La manera de ajustar el modelo es utilizando la Ecuación (6) solo para el valor del coeficiente K.

Donde:

$$K_a = \text{Antilog} [\text{Log } K + \text{Inv. Distr. Norm. Stand } (X\%) * E(t)] \quad (6)$$

- K_a : Valor ajustado
- $\text{Inv. Distr. Norm. Stand } (X\%)$: Inverso de la Distribución Normal Estándar del porcentaje de medición
- Error Típico: Es el error típico de todas las mediciones que intervienen en el primer gráfico.

Al remplazar la ecuación por los valores calculados se obtiene lo siguiente:

$$K_a = \text{Antilog} (2,9953 + (90\%) * 0,09429)$$

$$K_a = 1202,6022$$

Por lo tanto, manteniéndose el valor de α , el Modelo de Vibraciones a un 90% de confiabilidad de los datos, estará dado por la siguiente ecuación:

Por lo tanto, manteniéndose el valor de α , el Modelo de Vibraciones a un 90% de confiabilidad de los datos, estará dado de la siguiente manera:

$$PPV = 1202,6022 * \left(\frac{d}{W^{1/2}} \right)^{-1,8557}$$

Donde la ecuación de la línea remplazando el valor de K ajustado estará dada por:

$$y = -1,8557x + 3,0801$$

4. Teniendo en cuenta las dos ecuaciones anteriores con confiabilidad del 50% y del 90% se lleva acabo el desarrollo de la Ilustración 19.

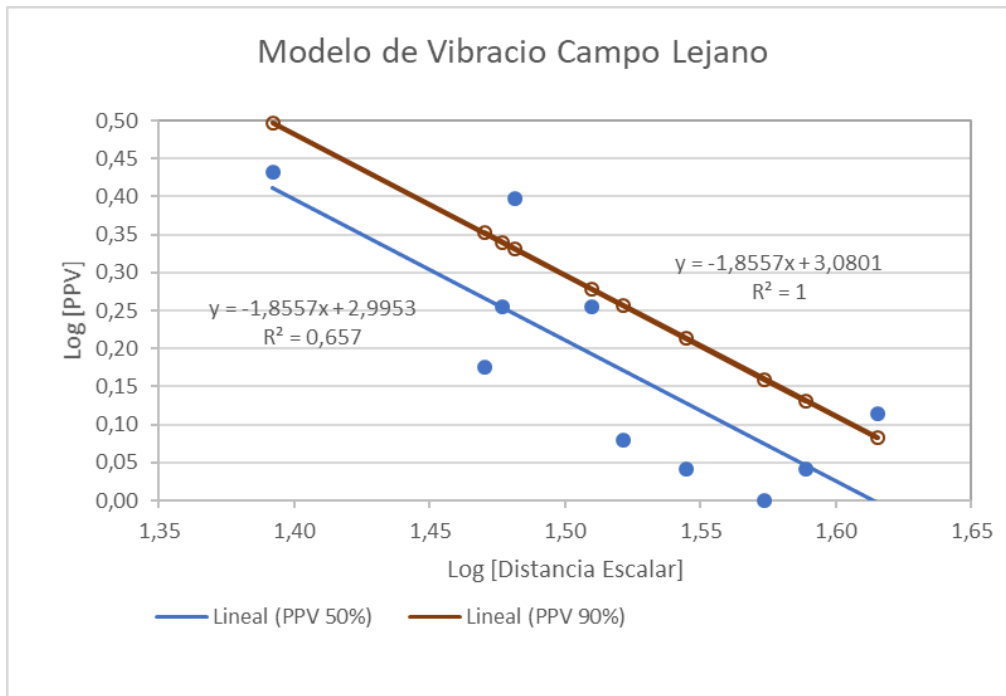


Ilustración 19 modelo de campo lejano con confiabilidad del 50% y 90%

Nota. Elaboración Propia.

- Para confirmar la confiabilidad de los valores de predicción de los niveles de vibración al 50% y 90% de confiabilidad se debe generar la Tabla 6 la cual compara los valores de predicción junto con los valores monitoreados.

Tabla 6 Confirmación de los valores de predicción al 50% y 90%.

Tabla de estimación del PPV, aplicando los modelos de Campo Lejano al 50% y 90% de confiabilidad.					
				50%	90%
			K	989,1398	1202,6022
PRUEBA #	De	PPV (mm/s)	Alfa	-1,8557	-1,8557
1	38,81	1,10		1,1134	1,3536
2	37,47	1,00		1,1883	1,4447
3	30,31	2,50		1,7609	2,1409
4	29,52	1,50		1,8493	2,2483
5	32,36	1,80		1,5600	1,8967
6	24,67	2,70		2,5819	3,1391
7	41,25	1,30		0,9941	1,2086
8	35,05	1,10		1,3451	1,6354
9	33,22	1,20		1,4858	1,8065
10	29,99	1,80		1,7962	2,1839

Nota. Elaboración Propia.

Claramente se aprecia que los datos remarcados de color amarillo en la tabla anterior son los datos de predicción que estuvieron por debajo de los datos medidos en campo, indicando que se pudo presentar un error en la medición o simplemente que se encuentran en el primer caso dentro del 50% no tomado en cuenta o para el segundo caso dentro del 10% restante.

6. Teniendo en cuenta los datos anteriores se debe desarrollar la siguiente Ilustración 20 la cual replantea las líneas de tendencia por unas líneas de tendencia exponenciales respecto del umbral máximo permitido por la norma DIN 4150 para edificaciones sensibles.

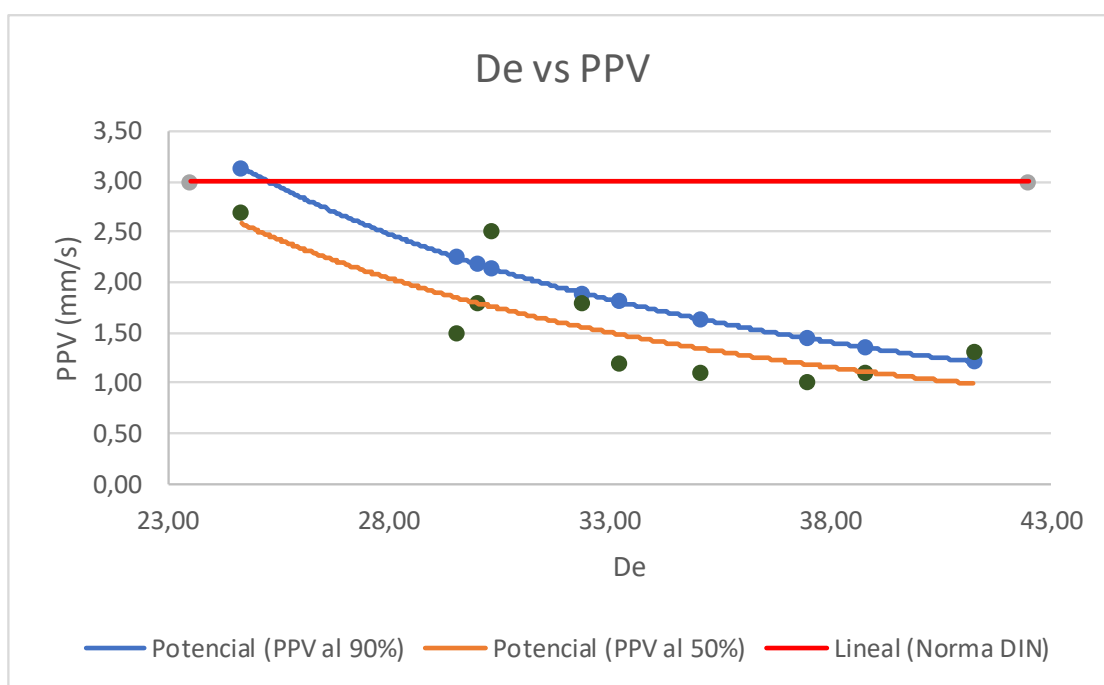


Ilustración 20 VPP para K y Ka respecto el umbral máximo de la norma DIN 4150.

Nota. Elaboración Propia.

7. Como paso a seguir se debe elaborar la Tabla 7 la cual contenga los valores de carga operante más comunes al igual que las distancias de registro estimadas, de los cuales al seleccionar un valor de carga operante que se considera detonar y la distancia estimada de monitoreo se obtiene una predicción de la PPV (velocidad pico de la partícula).

Tabla 7 Modelo de predicción de vibraciones para el campo lejano al 90% de confiabilidad.

K ajustado	1202,6022	Estimación del PPV, respecto a la Carga Operante (kg) Vs Distancia (m)				
Alfa	-1,8557	Distancia (m)				
Carga Operante (Kg)	500	600	700	800	900	1000
450	3,4151	2,4348	1,8291	1,4276	1,1473	0,9436
480	3,6258	2,5850	1,9419	1,5157	1,2181	1,0018
510	3,8356	2,7346	2,0543	1,6034	1,2886	1,0598
540	4,0445	2,8836	2,1662	1,6907	1,3588	1,1175
570	4,2526	3,0319	2,2776	1,7777	1,4287	1,1750
600	4,4599	3,1797	2,3886	1,8644	1,4983	1,2322
630	4,6664	3,3270	2,4993	1,9507	1,5677	1,2893
660	4,8723	3,4737	2,6095	2,0368	1,6369	1,3462
690	5,0774	3,6200	2,7194	2,1225	1,7058	1,4029
720	5,2819	3,7658	2,8289	2,2080	1,7745	1,4594
750	5,4858	3,9112	2,9381	2,2933	1,8430	1,5157
780	5,6892	4,0561	3,0470	2,3783	1,9113	1,5719
810	5,8919	4,2007	3,1556	2,4630	1,9794	1,6279
840	6,0941	4,3448	3,2639	2,5475	2,0474	1,6838
870	6,2958	4,4886	3,3719	2,6319	2,1151	1,7395
900	6,4970	4,6321	3,4797	2,7160	2,1827	1,7951

Nota. Fuente: Elaboración Propia.

8. Para una visualización gráfica de la carga que se puede utilizar respecto a la distancia de medición del sensor sin superar los límites de la norma DIN 4150 se debe realizar la Ilustración 21 que incluye las líneas para cada clasificación de estructuras. En dicha gráfica tan solo sabiendo el valor de la carga a utilizar se puede apreciar el valor de la distancia máxima a la cual no se genera daño dependiendo del tipo de edificación escogido, de igual manera si se conoce el valor de la distancia a la cual se encuentra la edificación se puede apreciar la carga máxima que se puede utilizar.

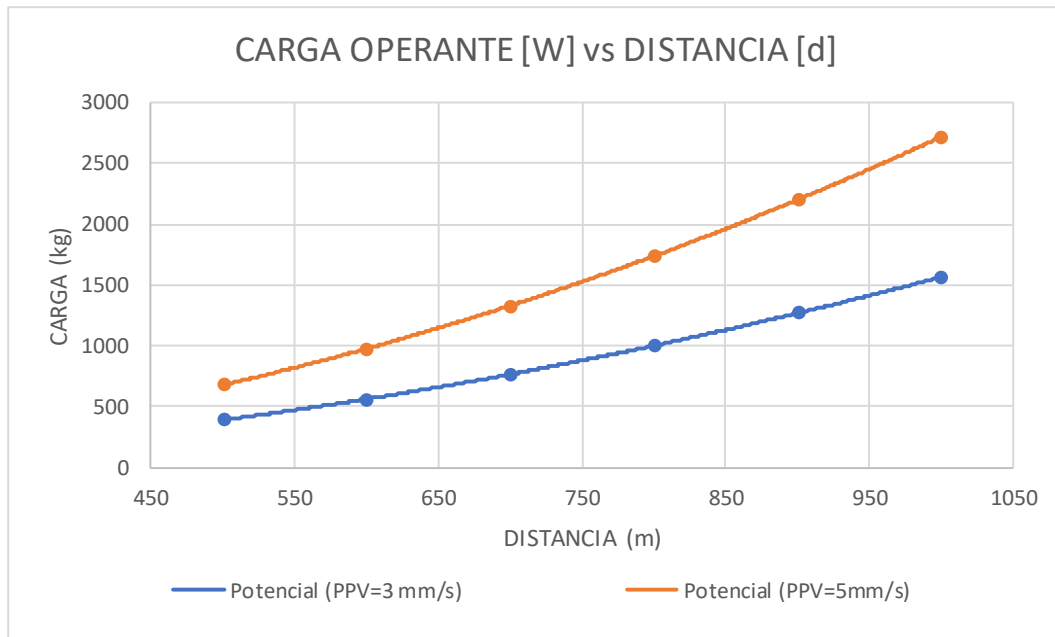


Ilustración 21 Umbrales máximos de la norma DIN respecto la carga y la distancia.

Nota. Fuente: Elaboración Propia.

9. Para finalizar se realiza la Ilustración 22 la cual fue elaborada con la finalidad de poder apreciar la carga que se puede utilizar teniendo en cuenta diferentes distancias de monitoreo y los parámetros establecidos por la norma DIN4150 que evitan la presencia de daños en estructuras sensibles.

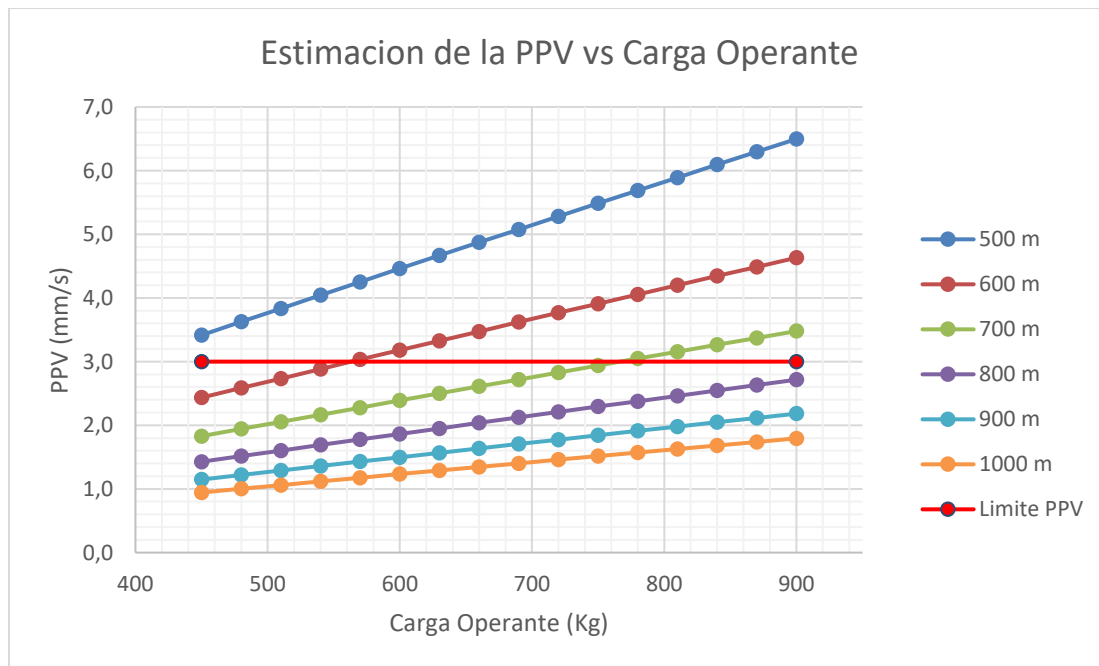


Ilustración 22 Estimación de la PPV vs Carga Operante

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Consideraciones del modelo de DEVINE.

Una consideración a tener en cuenta en el modelo de campo lejano propuesto por DEVINE es el valor del coeficiente de correlación (R^2) dado que al hallar la ecuación lineal o potencial sin ajustar este valor puede variar. Al obtener un coeficiente de correlación superior a 0,6 indica que el terreno donde se están llevando a cabo las mediciones es un terreno constante sin gran consideración de irregularidades, a diferencia de un coeficiente de correlación por debajo de 0,6 que indicaría un terreno disparejo con gran cantidad de irregularidades o la posibilidad de un error en la medición de las vibraciones. De igual manera se debe considerar ajustar el modelo para que los datos que este predice teniendo en cuenta la carga y la velocidad pico de partícula sean en lo posible superiores al obtenido mediante el monitoreo y de esta forma evitar vibraciones mayores que puedan ocasionar daños en las estructuras.

9 Capítulo

Conclusiones y Recomendaciones.

9.1 Conclusiones

Se realizó una investigación de la normatividad existente encargada de especificar métodos para medir y evaluar los efectos de las vibraciones en estructuras, especialmente las normas predeterminadas por el sensor ORION el cual es el dispositivo que posee la empresa K2 Ingeniería para las labores de medición. Gracias al estudio se logró realizar una tabla en la cual se especifican los parámetros más importantes a tener en cuenta por la empresa y se denotó lo que cada norma especifica sobre cada aspecto.

Gracias a la tabla desarrollada con base a las normas la empresa K2 Ingeniería podrá tener un enfoque claro y completo dependiendo las necesidades de sus clientes a los cuales podrá brindar asesorías certeras con gran soporte y conocimiento dependiendo de las normas que cada cliente necesite.

De la investigación realizada se logró apreciar la importancia que presenta la configuración de los diversos parámetros del sensor de vibraciones ORION, antes de la medición de vibraciones respecto a la gran influencia que presenta en la visualización de los datos al momento de realizar el respectivo procesamiento y análisis. El parámetro con mayor influencia en la visualización de datos es el periodo de grabación, por lo que se realizó un estudio exhaustivo en el cual se demostraron los efectos que se pueden producir en la lectura de datos y se denotó las recomendaciones de configuración del sensor.

Debido al método de configuración elaborado con base a los estudios y las pruebas realizadas con los equipos de medición, en los monitoreos que se requieran realizar se tendrá certeza de los resultados que se van a obtener garantizando la validez de los datos captados.

Se logró desarrollar un instructivo para el modelo de predicción de vibraciones generadas por voladuras para el campo lejano con base a unos datos muestra pero con total precaución y de gran validez para su implementación en cualquier procedimiento de monitoreo y análisis requerido por la empresa K2 ingeniería, sabiendo que todo modelo de predicción de vibraciones requiere un monitoreo previo en la zona específica de voladura debido a que se requiere calcular el factor controlado principalmente por el explosivo (K) y el factor de atenuación de la roca (α). Con base al monitoreo previo el modelo de predicción desarrollado se encarga de hallar el valor de los factores con el cual se genera la tabla de estimación de la velocidad pico máxima de la partícula respecto a la carga operante y la distancia, al igual que sus respectivos gráficos que facilitan el análisis de resultados.

9.2 Recomendaciones

Debido a que no se ha desarrollado ninguna norma para el tipo de edificaciones construidas en Colombia, se recomienda realizar un análisis de diseño sísmo resistente para determinar el nivel límite de sensibilidad a las vibraciones de dichas edificaciones sin sufrir daños y de esta manera ajustar el modelo predictivo acorde al tipo de estructuras construidas en Colombia.

Respecto al período de grabación se recomienda configurar los parámetros $T_i=1$ segundos y $T_j= 30$ segundos dado que son el rango mínimo y máximo respectivamente y por lo cual con el parámetro de grabación T_i se apreciará gran información detallada de cada pico presentado durante la grabación y el periodo T_j describirá un análisis general de todos los picos percibidos llegando a una sola velocidad pico de partícula con su respectiva frecuencia dominante. A diferencia de seleccionar parámetros similares o iguales debido a que sería enfocar la toma de datos en un solo periodo y no se aprovecharía la totalidad de los datos monitoreados.

El instructivo del modelo predictivo se desarrolló en base a unas características específicas por lo cual si se realizan voladuras con un explosivo diferente o se cambia la cantidad de taladros el factor K no sería el mismo, al igual que si las voladuras se realizan en una zona o terreno diferente para el cual fue desarrollado el factor de atenuación de la roca (α) cambiaría su valor. Por lo cual se recomienda que si se va a realizar algún cambio ya expresado se debe realizar un monitoreo previo con las nuevas especificaciones y validar nuevamente el modelo.

Se recomienda desarrollar labores de campo por parte de la empresa K2 Ingeniería en los cuales se realicen monitoreos de voladuras con el fin de implementar el modelo de campo lejano desarrollado.

Cuando el modelo está siendo implementado se deberá continuar con el monitoreo de voladuras con el propósito de ampliar la base de datos, afinar los factores de atenuación y controlar que la velocidad pico de la partícula medida no exceda la del modelo de predicción.

10 Lista de Referencias

- Benjumea, J. (2003). *VIBRACIONES CAUSADAS POR ACTIVIDAD HUMANA: caracterización, efectos y manejo en la ingeniería civil*. Santiago de cali.
- Carlos Scherpenisse, G. S. (2008). *ESTRATEGIA A LA PROBLEMÁTICA AMBIENTAL DE VIBRACIONES POR TRONADURA EN OPERACIONES MINERAS*. Santiago, Chile.
- Cereceda, E. (2015). *ANÁLISI DE VIBRACIÓN Y CÁLCULO DEL MODELO DE ATENUACIÓN PARA LA OPTIMIZACIÓN DE PERFORACIÓN Y VOLADURA EN LA UNIDAD MINERA DE UCHUCCHACUA*. AREQUIPA, PERÚ.
- Cintex, C. (2006). *Manual de Monitoreo de Vibraciones Gneradas por Tronaduras, Análisis y Modelamiento*. Chile: Blastechology A.B.N.
- ECI, E. c. (2012). *VIBRACIÓN PROTOCOLO CURSO DE CONDICIONES DE TRABAJO*. Bogota, Colombia.
- Fredy Cruzado, K. D. (2017). *ANÁLISIS DE LA MÁXIMA CARGA OPERANTE EN LAS VIBRACIONES A CAMPO LEJANO GENERADAS POR VOLADURAS, EN MINERA CERRO NEGRO S.A., CAJAMARCA-2017*. Cajamarca- Perú.
- IGME, I. G. (1987). *MANUAL DE PERFORACION Y VOLADURA DE ROCAS*. Madrid, ESPAÑA.
- Iriarte, G., & F. A. (2010). *CONTROL DE VIBRACIONES PARA LAS CASAS DE TIERRA EN PERU*. LIMA.
- José Bernaola, J. C. (2013). *PERFORACIÓN Y VOLADURA DE ROCAS EN MINERIA*. Madrid.
- K2 Ingenieria. (2017). *Monitoreo de Vibraciones Ambientales*. Bucaramanga.
- Nava, A. (1998). *TERREMOTOS. carretera picachu-Ajusco 227, México, D.F.: La ciencia para Todos*.
- Perez, W. J. (2009). *SELECCIÓN DEL EXPLOSIVO ADECUADO Y CARGA MAXIMA POR RETARDO USANDO EL MONITOREO, MODELAMIENTO Y ANÁLISIS DE VIBRACIONES*. Lima, Peru.
- Ramírez, J. A. (2013). *ESTIMACIÓN DEL RIESGO DE DAÑO DEBIDO A VIBRACIONES PRODUCIDAS POR MAQUINARIA PESADA CERCA DE VIVIENDAS*. Santiago de cali.
- Silva, G. (2008). *ESTRATEGIA A LA PROBLEMÁTICA AMBIENTAL DE VIBRACIONES POR TRONADURA EN OPERACIONES MINERAS*. Pucón, CHILE.
- US, U. d. (2008). *DISEÑO INTEGRADO*. Sevilla.

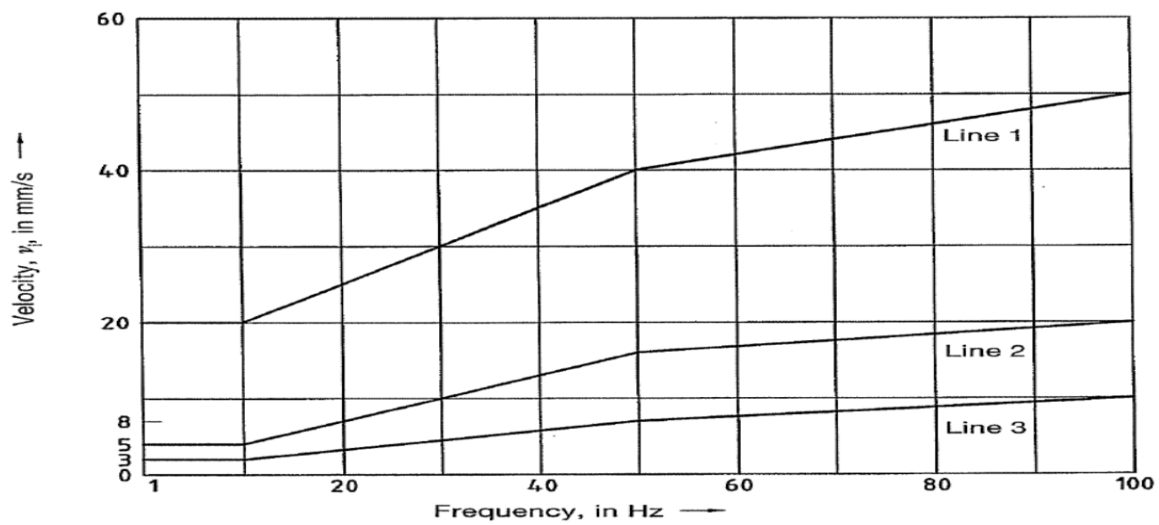
Anexos

Anexo 1 Valores guía para la velocidad de vibración debido a acontecimientos breves.

Línea	Tipo de estructura	Valores guía para la velocidad v_i en mm/s			
		Vibración en la cimentación a una frecuencia de			Vibración en el plano horizontal del piso más alto, en todas las frecuencias
		1 Hz a 10 Hz	10 Hz a 50 Hz	50 Hz a 100 Hz	
1	Edificios utilizados con fines comerciales, edificios industriales y edificios de diseño similar	20	20 a 40	40 a 50	40
2	Viviendas y edificios de diseño y/o ocupaciones similares	5	5 a 15	15 a 20	15
3	Estructuras que, debido a su particular sensibilidad a la vibración, no pueden clasificarse bajo las líneas 1 y 2 y son de gran valor intrínseco (por ejemplo, edificios bajo orden de conservación)	3	3 a 8	8 a 10	8
*) A frecuencias superiores a 100 Hz, los valores dados en esta columna pueden ser usados como valores mínimos.					

NOTA. Fuente: Alemannia, Deutsche Norm. Structural vibration part 3. (1999).

Anexo 2 Grafico de valores guía para la velocidad de vibración debido a acontecimientos breves.



NOTA. Fuente: Alemannia, Deutsche Norm. Structural vibration part 3. (1999).

Anexo 3 Valores guía para la velocidad de vibración debido a acontecimientos prolongados.

Línea	Tipo de estructura	Valores guía para la velocidad v_i en mm/s, de vibración en el plano horizontal del piso más alto, en todas las frecuencias
1	Edificios utilizados con fines comerciales, edificios industriales y edificios de diseño similar	10
2	Viviendas y edificios de diseño y/o ocupaciones similares	5
3	Estructuras que, debido a su particular sensibilidad a la vibración, no pueden clasificarse bajo las líneas 1 y 2 y son de gran valor intrínseco (por ejemplo, edificios bajo orden de conservación)	2,5

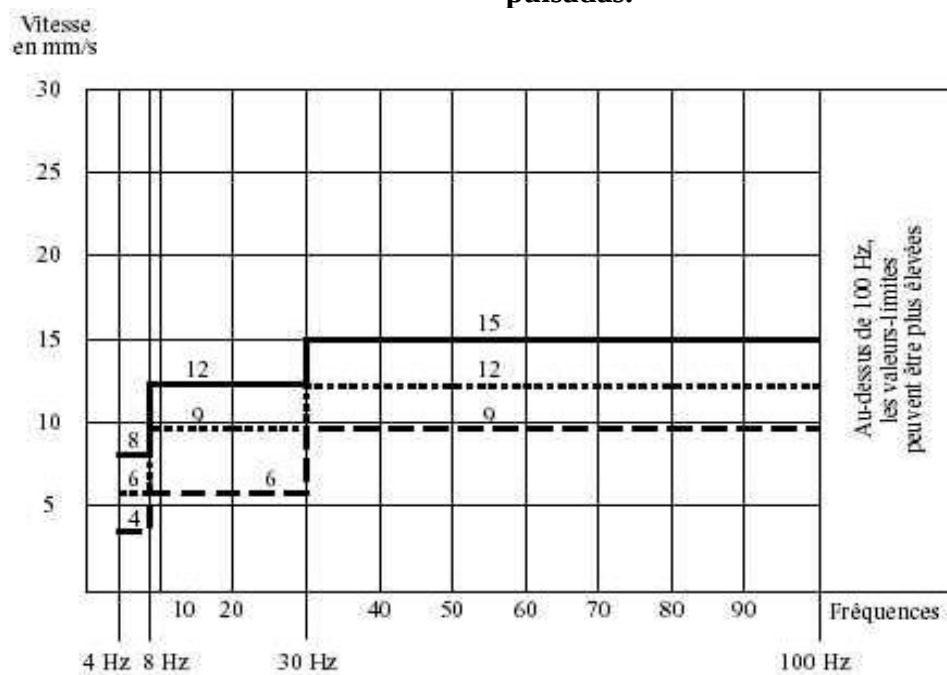
NOTA. Fuente: Alemannia, Deutsche Norm. Structural vibration part 3. (1999).

Anexo 4 Valores guía para la velocidad de vibración debido a acontecimientos prolongados en tuberías.

Línea	Material de la tubería	Valores guía para la velocidad medida sobre la tubería en v_i , en mm/s
1	Acero (incluyendo tuberías soldadas)	100
2	Arcilla, hormigón, hormigón armado, hormigón pretensado, metálico (con o sin brida)	80
3	Albañilería, plástico	50

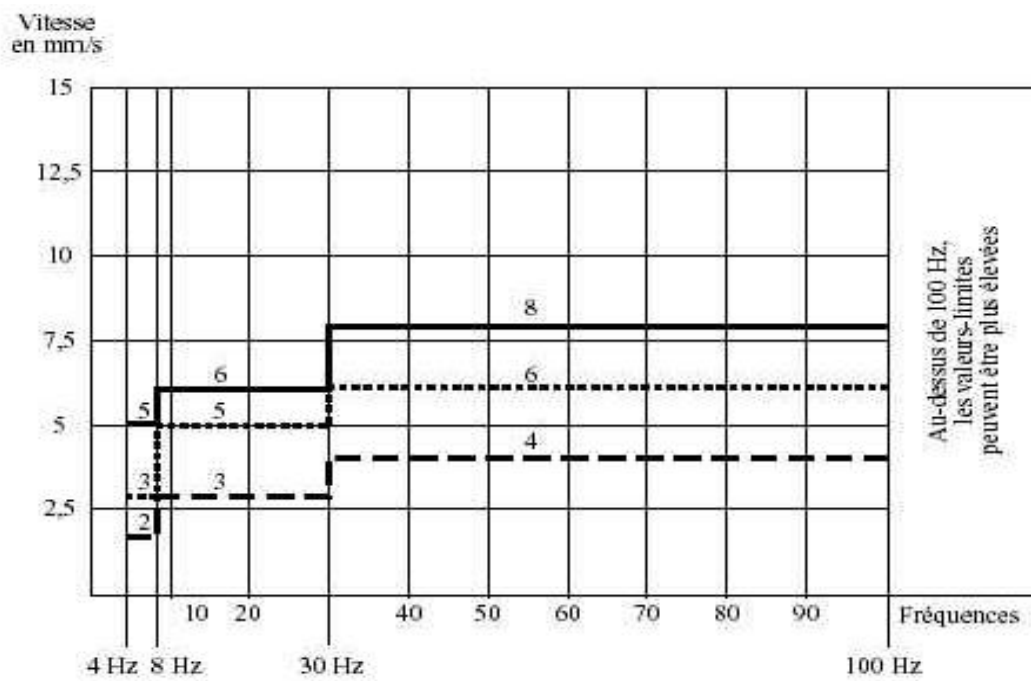
NOTA. Fuente: Alemannia, Deutsche Norm. Structural vibration part 3. (1999).

Anexo 5 Grafico de valores guía para la velocidad de vibración debido a vibraciones pulsadas.



Nota. Fuente: extraído de Circulaire du 23/07/86.

Anexo 6 Grafico de valores guía para la velocidad de vibración debido a vibraciones continuas.



Nota. Fuente: extraído de Circulaire du 23/07/86.

Anexo 7 Guía de intervalos de medición según el tipo de evento.

Tipo de evento	Fuente de vibración	Categoría del evento	Intervalo de observación	Intervalo de medición	Ejemplos de fuentes
Permanente	Conocida o desconocida	Estable	1 hora	30 segundos	Generador eléctrico
		Cíclico	Tres ciclos	Tres ciclos no adyacentes	Martillo de forja
		Otro	Un día seleccionado	Determinado por disparo dependiente de la amplitud	Tráfico pesado de automóviles
Intermitente	Única	Cíclico	Al menos tres ciclos completos	Un ciclo completo o la amplitud máxima por disparo	Pilote
		Estable	De acuerdo al modo de trabajo	Un evento o 30 segundos	Grupo de refrigeración
		Otro	De acuerdo al modo de trabajo	Determinado por disparo dependiente de la amplitud	Molino de trituration, Compactador
	Múltiple	Cada tipo de fuente se tratará de acuerdo con los criterios definidos para una fuente única	Un día seleccionado	Duración del evento	Tráfico de trenes
Aislado o único	Única		Un evento	Un evento	Voladuras

NOTA. Fuente: Suiza, Mechanical vibration and shock —Vibration of fixed structures — Guidelines for the measurement of vibrations and evaluation of their effects on structures. (2010).