



Proyecto de Investigación P0168-2014

Evaluación de la exposición a vibración de cuerpo entero que contiene múltiples choques según ISO2631-5:2004 y comparación con evaluación según ISO2631-1:1997, Directiva 2002/44/CE y legislación Nacional D.S. N°594/1999

Investigador: Alonso Carrillo Mayorga
Ingeniero Acústico, Diplomado en Ergonomía, Máster en Higiene Industrial.

Co-investigador: José Luis Urnía Meléndez.
Ingeniero Civil Acústico
Especialista Senior Ingeniería Ocupacional

FUNDACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA - ACHS

Este proyecto fue realizado con el financiamiento de la Asociación Chilena de Seguridad, a través de la Fundación Científica y Tecnológica, FUCYT.

INDICE

RESUMEN

1. INTRODUCCIÓN

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVOS GENERALES:

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

3. ANTECEDENTES.

3.1 Exposición Ocupacional a Vibración de Cuerpo entero

3.2 Efectos en la Salud

3.3 Respuesta de la columna vertebral ante vibración.

3.4 Normativa Nacional e Internacional para La evaluación de la Exposición a exposición a Vibraciones de Cuerpo Entero.

3.4.1 Norma Internacional ISO 2631-1:1997.

3.4.2 Legislación Nacional D.S. N°594/1999.

3.4.3 Legislación Europea Directiva 2002/44/CE

3.4.4 Norma ISO 2631-5.

3.4.5 Resumen de Parámetros de Evaluación entre las distintas normativas.

4. MATERIAL Y MÉTODO

4.1 Metodología

4.2 Materiales e Implementación.

4.2.1 Sistema de Registro y su Calibración.

4.2.2 Software para el proceso de los registros de Vibración

4.2.3 Vehículos seleccionados y grupos homogéneos de exposición a vibraciones.

4.2.4 Parámetros para el cálculo de los indicadores de riesgo.

5. RESULTADOS

6. DISCUSION

6.1 Tipo de Vibración Registrada

6.2 Respecto a la norma 2631-5:2004.

6.3 Respecto a la norma base ISO2631-1:1997.

6.4 Respecto a la Directiva 2002/44/CE.

6.5 Respecto al D.S. N°594/1999.

6.6 Comparación Evaluación del D.S. N°594/1999 con las otras Normativas.

7. CONCLUSIONES

8. RECOMENDACIONES Y TRABAJO A FUTURO.

9. AGRADECIMIENTOS

10. REFERENCIAS

RESUMEN

En este trabajo se registra la vibración en los lugares de trabajo de 74 vehículos de los rubros forestal, transporte de alimentos congelados y energía, registros que fueron procesados con los software Sigview 2.7.1 y Matlab R2016 para obtener simultáneamente los indicadores necesarios para la evaluación del riesgo de la exposición a vibración según las normas 2631-5:2004, ISO2631-1:1997, Directiva 2002/44/CE y la legislación nacional D.S.N°594/1999..

El análisis de los resultados y comparación de las evaluaciones efectuadas entre el D.S N°594/1999 con las otras normativas, implica que la legislación nacional subestima significativamente el riesgo de la exposición a vibraciones para el conjunto de lugares de trabajo medidos cuando en la exposición se presentan vibraciones impulsivas o de múltiples choques. Cuando la normativa legal europea 2002/44/CE consideraría un 94.5% de los casos medidos para incluirlos en un programa de acciones preventivas y de control de la exposición por sobrepasar el límite de acción y límite máximo, el DS N°594/1999 consideraría un 19.2% de los casos por sobrepasar el límite máximo nacional.

Algo similar a lo anterior ocurre con la comparación de la evaluación realizada con el D.S. N°594/1999 y la evaluación de la norma 2631-5:2004 donde esta última referencia alcanza un 86.3% de los casos superando los límites definidos para la compresión estática equivalente "Sed". Para el factor R de predicción de daño en la columna se estimó un tiempo aproximado de 5 años para igualar los niveles de riesgo proporcionado por el D.S. N°594/1999, aunque los indicadores utilizados para estas evaluaciones no pueden ser comparados debido a que la aceleración rms ponderada a_w subestima en su cálculo las componentes impulsivas de la vibración.

Palabras claves: Vibración, Cuerpo Entero, 2631-5:2004, Impacto, choque.

1. INTRODUCCION

Estudios epidemiológicos demuestran una fuerte asociación entre el factor "vibración de cuerpo entero" y las lesiones y/o enfermedades que afectan la zona baja de la espalda, donde su incidencia sería comparable a la ocasionada por el factor "levantamiento de carga" en el origen de una enfermedad profesional. Adicionalmente, cuando la vibración posee componentes impulsivas, o múltiples choques, aumenta la severidad de la exposición de las personas, utilizándose indicadores específicos para la valoración del riesgo.

En Chile, no se utilizan modelos de evaluación del riesgo que consideren vibración impulsiva o que contenga múltiples choques. La presencia de vibración de tipo impulsiva es usual en puestos de trabajo de operadores de vehículos de carga y transporte de materiales, situación que en nuestro país se aborda utilizando el indicador de vibración a_{eqw} (aceleración continua equivalente ponderada) que corresponde al "promedio" de la energía vibratoria presente en una exposición, donde las aceleraciones impulsivas o "choques", quedarían subestimadas al utilizar este indicador.

La norma internacional ISO2631-1:1997 "Evaluation of human exposure to whole-body vibration - General Requirements", que ha servido de base para la elaboración de la legislación chilena, propone el indicador Dosis de Vibración VDV para la el estudio de la exposición a vibración que contiene componentes impulsivas o choques, entre otros. La comunidad europea en el año 2005 implementó su nueva regulación respecto a la exposición a vibración de cuerpo entero y mano-brazo, Directiva 2002/44/CE que incorpora, además del indicador usual "aceleración ponderada rms a_w ", la "dosis de vibración VDV", el que permite mejorar el proceso valoración del riesgo.

La norma ISO2631-5:2004 "Evaluation of human exposure to whole-body vibration -- Part 5: Method for evaluation of vibration containing multiple shocks", establece un método para cuantificar la vibración de cuerpo entero que contiene múltiples choques y evaluar el efecto adverso en la salud, específicamente enfocado en la respuesta dinámica de la columna vertebral ante vibraciones impulsivas, cuando una persona está sentada, pudiendo además predecir la probabilidad de que ocurra un efecto adverso en una cantidad de años determinados en función de la condición de exposición actual registrada y medida.

Este trabajo busca implementar el método de evaluación ISO2631-5:2004, que utiliza modelos numéricos para el procesamiento de las muestras de vibración escasamente implementados en terreno, aplicados sobre vibración y exposición que contiene componentes impulsivas. También aportar con antecedentes para mejorar el proceso de evaluación del riesgo en la salud por exposición a vibraciones y la actualización de la legislación relacionada.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL.

Evaluación de la exposición a vibración de cuerpo entero que contiene múltiples choques según 2631-5:2004 y comparación con la evaluación según ISO2631-1:1997, Directiva 2002/44/CE y legislación Nacional D.S. N°594/1999 .

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

Implementar un sistema de registro y medición de terreno para efectuar la evaluación establecida en 2631-5:2004.

Implementar el método numérico en software de análisis digital de señales, MATLAB, para el cálculo de los indicadores de predicción del daño en columna vertebral y evaluación de la exposición a vibración según la norma 2631-5:2004, además de los indicadores de la norma ISO2631-1:1997 y D.S. N°594/1999 de Chile.

Comparación del resultado de la evaluación obtenida al aplicar los métodos usuales de evaluación a vibración de cuerpo entero, RMS y VDV (D.S.594/1999 y Directiva Europea) y el método propuesto por la Norma ISO2631-5 cuando la exposición contiene Múltiples Choques.

3. ANTECEDENTES.

3.1 Exposición Ocupacional a Vibración de Cuerpo entero.

Se entiende por vibración, el movimiento oscilatorio de las partículas de los cuerpos sólidos [1]. En el ámbito normativo, el término vibración, se define como la variación en el tiempo de una "magnitud o cantidad" que describe el movimiento o la posición de un sistema mecánico, donde la magnitud toma alternadamente valores más grandes o más pequeños que un valor promedio o valor de referencia [2].

La vibración de cuerpo entero, es aquella vibración que se transmite a todo el cuerpo a través del asiento o los pies, ocasionada por máquinas y vehículos en el lugar de trabajo. La exposición a altos niveles de vibraciones de cuerpo entero puede plantear riesgos para la salud y la seguridad, considerándose un factor causante o agravante de lesiones dorsales. Cuanto mayores son la magnitud, la duración, la frecuencia y la regularidad de las vibraciones, y cuando éstas incluyen fuertes choques o sacudidas, mayor es el riesgo [3].

La comunidad Europea, en su Directiva 2002/44/CE [4] y el protocolo para la aplicación del D.S. N°594/1999 del MINSAL – Vibraciones [5], plantean la "vibración de cuerpo entero" como :

“vibración mecánica que, cuando se transmite a todo el cuerpo, conlleva riesgos para la salud y la seguridad de los trabajadores, en particular, lumbalgias y lesiones de la columna vertebral .

Los trabajos que conllevan una exposición a vibraciones de cuerpo completo se relacionan a menudo con actividades “fuera de carretera”, por ejemplo en la agricultura, la construcción o la minería, pero las vibraciones también pueden producirse en otros lugares, tales como la carretera, en camiones, el mar, en pequeñas embarcaciones rápidas, o el aire, en algunos helicópteros.

Se considera que el mayor riesgo de exposición a las vibraciones, se debe a la exposición a las vibraciones que contienen impactos. Las vibraciones de impacto pueden deberse a carreteras con pavimento en mal estado, la conducción a una velocidad excesiva para un terreno determinado o una regulación incorrecta de la suspensión del asiento. Algunos vehículos con cargas muy pesadas pueden transmitir choques y sacudidas al conductor al frenar con fuerza [3].

3.2 Efectos en la Salud.

La transmisión de la vibración al cuerpo de un individuo, depende de la postura de éste y sus efectos son complejos. La exposición a vibración de cuerpo entero produce movimientos y fuerzas en el interior del cuerpo humano que pueden, de acuerdo con estudios epidemiológicos, causar molestias, afectar el desempeño, afectar negativamente la parte baja de la espalda y columna [6].

Se ha observado una alta tasa de prevalencia de dolor en la parte baja de la espalda, discos herniados y degeneración temprana de la columna en los grupos expuestos [6] [7].

Estudios epidemiológicos han demostrado una fuerte asociación entre el factor “vibración de cuerpo entero” y las lesiones y/o enfermedades que afectan a la zona baja de la espalda, donde su incidencia tiene la misma ponderación que el factor “levantamiento de carga” en el origen de una enfermedad profesional [8].

La revisión de la estadística de lesiones en la zona lumbar sólo el año 2011 en ACHS, presentó un total de, aproximadamente 11.000 casos, donde el primer lugar de los diagnósticos se concentra en la actividad económica de “Grandes Establecimientos – Hipermercados” y en segundo lugar “Transporte de Carga por Carretera”. En los dos casos se presentan los factores de levantamiento de carga y vibración, siendo la segunda actividad económica donde el agente vibración predomina.

Adicionalmente, el porcentaje de trabajadores conductores de vehículos (presencia cierta de vibración) que presentaron lesiones en la zona baja de la espalda en 2011 del total de 11000 casos, constituyen aproximadamente el 10 % del total, con 3500 días tratamiento y 2800 días

perdidos, aproximadamente, siendo los sectores productivos con mayores casos el de Transporte, Comercio Retail, Industria, Forestal Maderero y Construcción.

3.3 Respuesta de la columna vertebral ante vibración.

Estudios de la respuesta de la columna vertebral referenciados en la normativa 2631-5:2004:2004, determinaron que en los ejes X e Y la respuesta de la columna es aproximadamente lineal, representada por un sistema de un grado de libertad (modelo de los parámetros concentrados) con una frecuencia de resonancia de 2.125 Hz, no así en la dirección del eje Z, donde la respuesta dinámica ante una vibración de entrada, es de tipo No Lineal, cuyo movimiento pudo ser representado por un modelo numérico de red neuronal iterativo [9].

Se han utilizado diversos modelos biodinámicos experimentales para establecer la respuesta dinámica de la columna vertebral y el posible daño ante las vibraciones [10] [11] y otros donde se han efectuado ensayos de cargas estáticas y dinámicas sobre especímenes espinales de donantes jóvenes y otros de mayor edad, asimilables a edades típicas de ambientes laborales, estableciéndose in vitro, los niveles de fatiga para compresiones alternas inducidas en las vertebrae, generando en ellas presiones del orden de 1.4 MPa, planteándose inicialmente que la edad de la persona sería un factor relevante relacionado con la fatiga y daño de la columna sometida a vibración [12] [9]. A modo de ejemplo, en la figura N°1 se muestra un modelo teórico para el estudio del movimiento de la columna sometida a vibración y en la figura N°2 un montaje para generar fuerzas dinámicas y estáticas sobre piezas vertebrales.

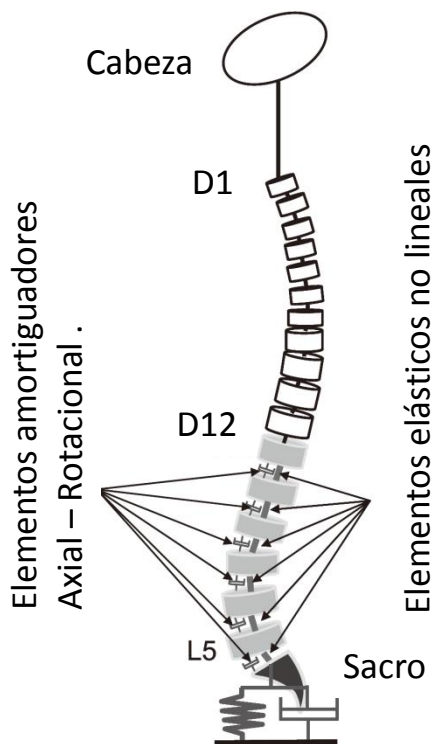


Figura 1.- Ejemplo de representación general de la columna vertebral para el estudio de su respuesta a vibración por el método de elementos finitos.

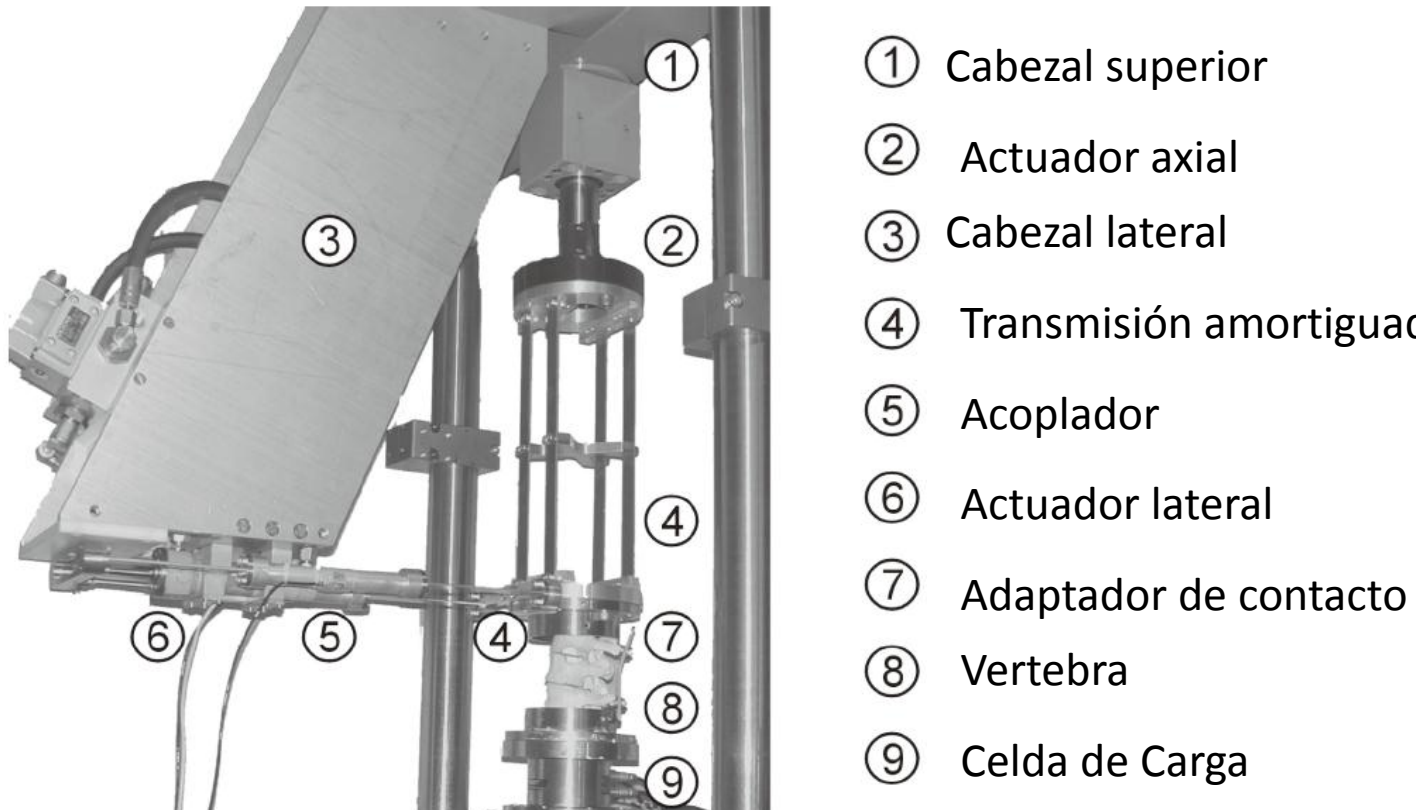


Figura 2.- Ejemplo de sistema hidráulico para el test de carga estática y dinámica sobre elementos vertebrales y determinación de fatiga estructural.

3.4 Normativa Nacional e Internacional para La evaluación de la Exposición a exposición a Vibraciones de Cuerpo Entero.

3.4.1 Norma Internacional ISO 2631-1:1997.

El propósito de esta norma es definir métodos de cuantificación de la vibración de cuerpo entero (WBV), e indicar los principales factores que determinan el grado al cual la exposición a la vibración será aceptable. Esta considera vibraciones en el rango de frecuencia de 0,5 Hz a 80 Hz [13].

La norma es aplicable a movimientos transmitidos al cuerpo humano como un todo a través de superficies de apoyo: pies de una persona parada, los glúteos, espalda y pies de una persona sentada o el área de apoyo de una persona reclinada. Este tipo de vibración es encontrada en vehículos, maquinarias, edificios y en proximidades de trabajos con maquinarias.

El método básico de evaluación se basa en la obtención de la Aceleración **rms** Ponderada, la que se calcula mediante la ecuación 1 y medida en la dirección de tres ejes ortogonales que se indican en la Figura 3.

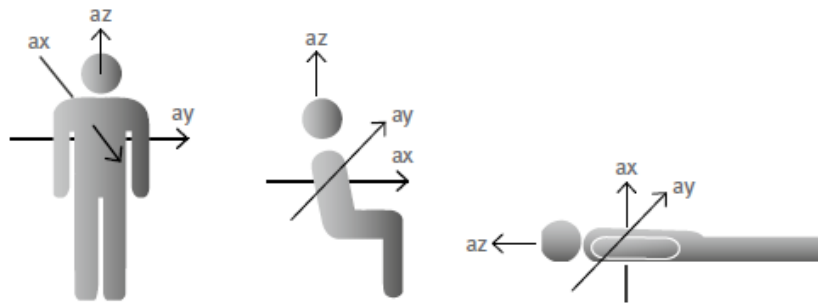


Figura 3.- Dirección de medición de la aceleración vibratoria ponderada, Según la postura de exposición.

$$a_w = \left[\frac{1}{T} \int_0^T a_w^2(t) dt \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

donde:

$a_w(t)$ = Es la aceleración ponderada como función del tiempo en m/s^2 .

T = Es el tiempo de la medición en segundos.

La aplicabilidad de la ecuación 1 dependerá del factor de cresta (FC9), indicador que se define como la razón del máximo valor **peak** de la señal de aceleración y su valor en **rms** ponderado, según la ecuación 2 y que de.

$$FC = \frac{a_w \text{ peak}}{a_w} \quad (2)$$

Para vibraciones con un $FC < 9$, el indicador a_w es suficiente, pero si es mayor, se propone utilizar el valor de la Dosis de Vibración (VDV) que considera la cuarta potencia de las aceleraciones medidas, como se muestra en la ecuación 3. Este indicador es preferido cuando la vibración presenta componentes impulsivas o de impacto, $FC > 9$, midiéndose en $m/s^{1.75}$.

$$VDV = \left\{ \int_0^T [a_w(t)]^4 dt \right\}^{\frac{1}{4}} \quad (3)$$

Para evaluar el riesgo de la exposición ocupacional a vibraciones con la aceleración rms ponderada a_w , ésta se debe normalizar o transformar a una vibración equivalente con un tiempo de exposición de 8 horas, utilizando la ecuación 4.

$$a_{w(8)} = k_i a_{w,Te} \left[\frac{T \exp}{8} \right]^{1/2} \quad (4)$$

donde:

$a_{w(8)}$: Valor de exposición diaria normalizado a 8 horas (m/s^2).

k_i : Factor adimensional dependiente del eje de medición, correspondiendo a $k_x = k_y = 1.4$ y $k_z = 1$ para cuerpo entero.

$a_{w,Te}$: Aceleración rms, asociada al tiempo de exposición Te (m/s^2).

$T \exp$: Tiempo de exposición efectivo (horas).

Para evaluar el riesgo de la exposición ocupacional a vibraciones con la Dosis de Vibración VDV , ésta se debe normalizar o transformar a una Dosis equivalente con un tiempo de exposición de 8 horas, utilizando la ecuación 5.

$$VDV_{(8)} = k_i VDV \left[\frac{T \exp}{Tmed} \right]^{1/4} \quad (5)$$

$VDV_{(8)}$: Dosis de Vibración normalizada a 8 horas ($m/s^{1.75}$).

k_i : Factor adimensional dependiente del eje de medición, correspondiendo a $k_x = k_y = 1.4$ y $k_z = 1$ para cuerpo entero.

VDV : Dosis de Vibración parcial, asociada al tiempo de medición $Tmed$ ($m/s^{1.75}$).

$T \exp$: Tiempo de exposición efectivo (horas).

$Tmed$: Tiempo de medición de la exposición (horas).

Aunque no está explícito en esta norma, según la zona de precaución de la salud plantea límites entre 4 y 8 horas de exposición para la aceleración RMS y VDV, los que corresponde a los siguientes:

a) Un valor límite para 8 horas de exposición de 0.81 m/s^2 para la aceleración rms ponderada $a_{w(8)}$, o de un valor de dosis de vibración VDV(8) de $17 \text{ m/s}^{1.75}$, si la vibración posee componentes impulsivas.

b) El valor de acción, donde comenzarían a presentarse casos de enfermedad o lesión corresponde a $0,5 \text{ m/s}^2$ de aceleración rms ponderada $a_{w(8)}$, o de un valor de dosis de vibración VDV(8) de $8,5 \text{ m/s}^{1.75}$, si la vibración contiene componentes impulsivas.

3.4.2 Legislación Nacional D.S. N°594/1999.

Nuestra legislación nacional, Decreto supremo N°594/1999, utilizó como referencia la norma señalada anteriormente para evaluar el riesgo de la exposición de cuerpo entero, adoptando el valor de la aceleración ponderada rms a_w , que en este documento se denomina aceleración equivalente ponderada en frecuencia a_{eq} .

A continuación se señalan los artículos de la legislación relacionadas con la exposición a vibración de cuerpo entero.

ARTÍCULO 85: En la exposición a vibraciones globales o de cuerpo entero, la aceleración vibratoria recibida por el individuo deberá ser medida en la dirección apropiada de un sistema de coordenadas ortogonales (ver Figura 3), tomando como punto de referencia el corazón. Considerando el eje $Z(a_z)$ de los pies a la cabeza, eje $X(a_x)$ de la espalda al pecho y eje $Y(a_y)$ de derecha a izquierda.

ARTÍCULO 86: Las mediciones de la exposición a vibración se deberán efectuar con un sistema de transducción triaxial, con el fin de registrar con exactitud la aceleración vibratoria generada por la fuente, en la gama de frecuencias de 1 Hz a 80 Hz.

La medición se deberá efectuar en forma simultánea para cada eje coordenada (a_z , a_x , a_y), considerándose como magnitud el valor de la aceleración equivalente ponderada en frecuencia (a_{eq}) expresada en metros por segundo al cuadrado (m/s^2).

ARTÍCULO 87: La aceleración equivalente ponderada en frecuencia (a_{eq}) máxima permitida para una jornada de 8 horas por cada eje de medición, será la que se indica en la Tabla 1.

Tabla 1. Aceleración equivalente ponderada en frecuencia (a_{eq}) máxima permitida para una jornada de 8 horas por cada eje de medición

| Eje de Exposición | a_{eq} Máxima Permitida |
|-------------------|---------------------------|
| Z | 0.63 |
| X | 0.45 |
| Y | 0.45 |

ARTÍCULO 88: Aceleraciones equivalentes ponderadas en frecuencia diferentes a las establecidas en el artículo 87 se permitirán siempre y cuando el tiempo de exposición no exceda los valores indicados en la Tabla 2.

Tabla 2. Límites permisibles según exposición.

| Tiempo de Exposición (horas) | a_{eq} Máxima Permitida (m/s^2) | | |
|------------------------------|---------------------------------------|------|------|
| | Z | X | Y |
| 12 | 0.5 | 0.35 | 0.35 |
| 11 | 0.53 | 0.38 | 0.38 |
| 10 | 0,56 | 0,39 | 0,39 |
| 9 | 0,59 | 0,42 | 0,42 |
| 8 | 0,63 | 0,45 | 0,45 |
| 7 | 0,70 | 0,50 | 0,50 |
| 6 | 0,78 | 0,54 | 0,54 |
| 5 | 0,90 | 0,61 | 0,61 |
| 4 | 1,06 | 0,71 | 0,71 |
| 3 | 1,27 | 0,88 | 0,88 |
| 2 | 1,61 | 1,25 | 1,25 |
| 1 | 2,36 | 1,70 | 1,70 |
| 0.5 | 3,30 | 2,31 | 2,31 |

3.4.3 Legislación Europea Directiva 2002/44/CE

Esta normativa de la Comunidad Europea, publicada en el año 2002 e implementada en el año 2005, establece las disposiciones mínimas de seguridad y salud relativas a la exposición de los trabajadores a los riesgos derivados del agente físico vibración. Incluye los mismos indicadores señalados anteriormente para la norma ISO2631-1:1997, la aceleración rms ponderada a_w y la dosis de vibración VDV.

Para vibración de cuerpo entero esta directiva establece lo siguiente para evaluar la exposición:

a) El valor límite de exposición diaria normalizado a un período de referencia de 8 horas será de $1,15 m/s^2$ para la aceleración rms ponderada $a_{w(8)}$, o de un valor de dosis de vibración VDV(8) de $21 m/s^{1,75}$, si la vibración contiene componentes impulsivas.

b) El valor de acción de la exposición diaria estandarizada a un período de referencia de 8 horas será de $0,5 \text{ m/s}^2$ la aceleración rms ponderada $a_{w(8)}$, o de un valor de dosis de vibración VDV(8) de $9,1 \text{ m/s}^{1,75}$, si la vibración contiene componentes impulsivas.

La metodología para obtener las aceleraciones y dosis de esta directiva, tiene como base o referencia la norma ISO 2631-1:1997.

Esta normativa obliga a los países miembros de la Comunidad Europea, tomar medidas preventivas y de control de la exposición para todos los lugares de trabajo que superen el límite de acción.

3.4.4 Norma ISO 2631-5.

La norma 2631-5:2004 establece un método para cuantificar la vibración de cuerpo entero que contiene múltiples choques y evaluar el efecto adverso en la salud, específicamente enfocado en la respuesta dinámica de la columna vertebral ante vibraciones impulsivas, cuando una persona está sentada, pudiendo predecirse la probabilidad (alta, media o baja) de que ocurra un efecto adverso en una cantidad de años determinados en función de la condición de exposición actual registrada y medida.

Se requiere capturar la señal de vibración en el asiento, que constituye la vibración de entrada a la columna, la cual se debe procesar por el modelo de respuesta dinámica establecido en ISO 2631-5, a modo de filtro aproximadamente lineal (ejes X e Y) y no lineal (eje Z), para luego efectuar un conteo de los Peaks presentes en la señal filtrada y calcular una Dosis de Vibración proporcional a la sexta potencia de las aceleraciones, para finalmente establecer una baja o alta probabilidad de efecto adverso en la salud del individuo expuesto.

La respuesta espinal para los ejes X e Y para una aceleración externa de entrada a_{sx} y a_{sy} , correspondería a la siguiente:

$$a_{lk}(t) = 2 \zeta \omega_n (v_{sk} - v_{lk}) + \omega_n^2 (s_{sk} - s_{lk}) \quad (6)$$

Donde

| | |
|-----------------------------------|--|
| k | es el eje x o y. |
| s_{sk} y s_{lk} | son la historia de los desplazamientos en el asiento y en la columna. |
| v_{sk} y v_{lk} | son la historia de las velocidades en el asiento y en la columna. |
| $\xi = 0,22$ | es el factor de amortiguamiento crítico. |
| $\omega_n = 13,35 \text{ s}^{-1}$ | es la velocidad angular de la frecuencia natural de vibración de la columna (2.125Hz). |

La aceleración del eje Z de la zona lumbar de la columna, $a_{lz}(t)$ en metros por segundo al cuadrado, se obtiene utilizando la ecuación (7) que se muestra a continuación:

$$a_{lz}(t) = \sum_{j=1}^7 W_j u_j(t) + W_8 \quad (7)$$

$$u_j(t) = \tanh \left[\sum_{i=1}^4 w_{ji} a_{lz}(t-i) + \sum_{i=5}^{12} w_{ji} a_{sz}(t-i+4) + w_{j13} \right] \quad (8)$$

Donde:

a_{sz} , es la aceleración medida en el eje Z en el asiento del trabajador.

Los coeficientes W_j y w_{ji} en las ecuaciones (6) y (7) están especificados para frecuencias de muestreo de las señales de vibración de 160 Hz, por lo tanto, la instrumentación o el proceso de las señales debe ser ajustada para conseguir esta tasa de muestreo.

Los valores de los coeficientes de las ecuaciones (6) y (7) se indican en las Tablas 5 y 6.

Tabla 5 —coeficientes de la ecuación (7) , eje Z

| W_1 | W_2 | W_3 | W_4 | W_5 | W_6 | W_7 | W_8 |
|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
| 57,96539 | 52,32773 | 49,78227 | 53,16885 | 56,02619 | -27,79550 | 72,34446 | 21,51959 |

Tabla 6 —coeficientes de la ecuación (8) , eje Z

| <i>j</i> | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| w_{j1} | 0,00130 | 0,01841 | -0,00336 | 0,01471 | 0,00174 | 0,00137 | 0,00145 |
| w_{j2} | -0,00646 | -0,00565 | -0,00539 | 0,01544 | -0,00542 | 0,00381 | 0,00497 |
| w_{j3} | -0,00091 | -0,02073 | 0,00708 | -0,00091 | 0,00255 | -0,00216 | 0,01001 |
| w_{j4} | 0,00898 | -0,02626 | 0,00438 | -0,00595 | -0,00774 | -0,00034 | 0,01283 |
| w_{j5} | 0,00201 | 0,00579 | 0,00330 | -0,00065 | -0,00459 | -0,00417 | -0,00468 |
| w_{j6} | 0,00158 | 0,00859 | 0,00166 | 0,00490 | -0,00546 | 0,00057 | -0,00797 |
| w_{j7} | 0,00361 | 0,00490 | 0,00452 | 0,00079 | -0,00604 | -0,00638 | -0,00529 |
| w_{j8} | 0,00167 | -0,00098 | 0,00743 | 0,00795 | -0,01095 | 0,00627 | -0,00341 |
| w_{j9} | -0,00078 | -0,00261 | 0,00771 | 0,00600 | -0,00908 | 0,00504 | 0,00135 |
| w_{j10} | -0,00405 | -0,00210 | 0,00520 | 0,00176 | -0,00465 | -0,00198 | 0,00451 |
| w_{j11} | -0,00563 | 0,00218 | -0,00105 | 0,00195 | 0,00296 | -0,00190 | 0,00306 |
| w_{j12} | -0,00372 | 0,00037 | -0,00045 | -0,00197 | 0,00289 | -0,00448 | 0,00216 |
| w_{j13} | -0,31088 | -0,95883 | -0,67105 | 0,14423 | 0,04063 | 0,07029 | 1,03300 |

La dosis de aceleración D_k en metros por segundo al cuadrado, en la dirección k -ésima, se define como:

$$D_k = \left[\sum_i A_{ik}^6 \right]^{1/6} \quad (9)$$

donde

A_{ik} es el i -ésimo peak de la respuesta de aceleración $a_k(t)$ con $k = x, y$ o z .

Para la evaluación del efecto en la salud, se determina la dosis de aceleración promedio diaria D_{kd} , a la cual una persona podría estar expuesta, usando la siguiente ecuación:

$$D_{kd} = D_k \left[\frac{t_d}{t_m} \right]^{1/6} \quad (10)$$

donde

t_d es la duración de la exposición diaria;

t_m es el período sobre el cual D_k ha sido medido.

Posteriormente, con el indicador de la ecuación (10) se calcula la "Dosis de compresión estática equivalente" en megapascales MPa, como se indica en la ecuación (11), utilizada para la evaluación del riesgo de la exposición a vibración impulsiva o con múltiples choques.

$$S_{ed} = \left[\sum_{k=x,y,z} (m_k D_{kd})^6 \right]^{1/6} \quad (11)$$

Donde lo m_k son constantes recomendadas con los valores que se indican:

$$m_x = 0,015 \text{ MPa}/(\text{m}/\text{s}^2)$$

$$m_y = 0,035 \text{ MPa}/(\text{m}/\text{s}^2)$$

$$m_z = 0,032 \text{ MPa}/(\text{m}/\text{s}^2)$$

Posteriormente, se define el factor "R" en función del Sed, utilizado para predecir el riesgo de la exposición, dependiendo también de la edad del sujeto y de los años proyectados de exposición, como lo señala la ecuación 12.

$$R = \left[\sum_{i=1}^n \left(\frac{S_{ed} \cdot N^{1/6}}{S_{ui} - c} \right)^6 \right]^{1/6} \quad (12)$$

donde :

- N es el número de días de exposición en un año;
- I es el contador de años;
- n es el número de años de exposición;
- c constante que representa la compresión estática debido a la fuerza de gravedad;
- S_{ui} es la última compresión de la espina lumbar para una persona de edad $(b+i)$;
- b edad a la cual la exposición a vibración comienza.

Los valores de S_{ui} varían según la densidad ósea de la vertebra, la que normalmente disminuye con la edad. Estudios in-vitro, determinaron la siguiente relación entre S_{ui} (en megapascales) y $b+i$:

$$S_{ui} = 6,75 - 0,066 (b + i) \quad (13)$$

Para la evaluación de los efectos adversos en la salud, los parámetros para Sed son 0.5 MPa para obtener una Baja probabilidad de efecto adverso y de 0.8 MPa para obtener una Alta probabilidad de efecto adverso en la columna.

En el caso del factor R, los parámetros propuestos en la normativa son 0.8 para obtener una Baja probabilidad de efecto adverso y de 1.2 MPa para obtener una Alta probabilidad de efecto adverso en la columna, predicho en un periodo de tiempo determinado (años).

3.4.5 Resumen de Parámetros de Evaluación entre las distintas normativas.

En la Tabla N°7 se presenta una guía o resumen de los indicadores y parámetros que servirán para evaluar las vibraciones medidas en este estudio, junto con la calificación del riesgo.

Tabla 7.- Guía para la Evaluación de la exposición a vibración y calificación del riesgo, D.S. N°594/1999, ISO2631-1:1997 y Directiva 2002/44/CE.

| D.S N°594/1999 | | ISO2631-1:1997 | | 2002/44/CE | | ISO2631-5:2004 | | |
|-------------------|-----------------------------|---|------------------------------|---|------------------------------|-----------------------------|--------------------|---------------------------------------|
| Exposición (m/s²) | Calificación | Exposición (m/s² o m/s ^{1.75}) | Calificación | Exposición (m/s² o m/s ^{1.75}) | Calificación | Exposición (MPa) | | Calificación |
| $a_w < 0.63^*$ | BLM: Bajo el Límite Máximo | $a_w < 0.5$ VDV < 8.5 | BLA: Bajo Límite de Acción | $a_w < 0.5$ VDV < 9 | BLA: Bajo Límite de Acción | Sed ≤ 0.5 | R ≤ 0.8 | B: Baja Probabilidad Efecto Adverso |
| | | $0.5 \leq a_w < 0.81$ $8.5 \leq \text{VDV} < 17$ | P: Precaución para la salud. | $0.5 \leq a_w < 0.81$ $9 \leq \text{VDV} < 21$ | P: Precaución para la salud. | $0.5 < \text{Sed} \leq 0.8$ | $0.8 < R \leq 1.2$ | M: Probabilidad Media Efecto Adverso. |
| $a_w \geq 0.63^*$ | SLM: Sobre el Límite Máximo | $a_w \geq 0.81$ VDV ≥ 17 | SLM: Sobre el Límite Máximo | $a_w \geq 0.81$ VDV ≥ 21 | SLM: Sobre el Límite Máximo | Sed > 0.8 | R > 1.2 | A: Alta Probabilidad Efecto Adverso |

4. MATERIAL Y MÉTODO

4.1 Metodología

- Implementar un sistema de registro simultáneo de la señal de vibración en los ejes X, Y y Z, en el lugar de exposición de los trabajadores, asiento del operador, compatible con los indicadores, parámetros y requisitos establecidos por la normativa señalada, y además por la norma de instrumentación de vibración humana ISO8041:2005. El sistema de registro será calibrado con instrumental de referencia.
- Implementar una herramienta de cálculo computacional para el proceso de los registros de vibración triaxial y la modelación de la respuesta dinámica de la columna vertebral según la norma 2631-5:2004. La rutina de procesamiento de señales de vibración, será calibrada y validada con señales digitales de referencia y respuesta teórica conocida. Simultáneamente se incluirán en la programación de la herramienta, el cálculo de los indicadores requeridos por el D.S.Nº594/1999, ISO2631-1:1997 y Directiva 2002/44/CE,
- Seleccionar un conjunto de vehículos de carga y transporte, utilizados dentro y fuera de carretera, con la presencia de exposición a vibración que contiene múltiples choques.
- Registrar la vibración en los lugares de trabajo de los vehículos seleccionados, para posteriormente procesar los registros de vibración con la herramienta de proceso implementada.
- De acuerdo al resultado del proceso de cálculo, evaluar el riesgo de la exposición a vibración para cada lugar de trabajo, comparando la evaluación conseguida por cada normativa.

4.2 Materiales e Implementación.

4.2.1 Sistema de Registro y su Calibración.

Para el registro de la vibración se utilizó sensores de vibración GCDataconcept, modelo X16-mini (ver figura 4).



Figura 4.- Acelerómetro triaxial digital utilizado

Este acelerómetro contiene una memoria interna de 8GB, en la cual se pueden registrar varias horas de vibración triaxial con una frecuencia de muestreo de hasta 800 Hz por cada canal. Posee una batería de litio que permite su funcionamiento hasta, aproximadamente, 7 horas. La información registrada, archivos en formato de texto, se puede descargar via USB a un computador.

Se midió la respuesta de frecuencia de cada acelerómetro triaxial utilizado mediante su comparación con un acelerómetro patrón de laboratorio PCB 301A03 y tarjeta de adquisición NI9234, activado por un excitador electromecánico Bruel Kjaer Ty 4810 y un generador de señales National Instruments NI6289, efectuando un barrido de frecuencias en tercios de octava desde 1Hz a 250 Hz con señales sinusoidales¹, obteniéndose tres curvas de compensación o calibración en dB para cada eje y sensor. También se efectuaron test de linealidad de nivel y de la velocidad de muestreo, con resultados satisfactorios. El instrumental de referencia señalado fue calibrado en laboratorio acreditado ISO 17025.

Cada acelerómetro se instaló en el interior de un acoplador de caucho normalizado para la medición de la exposición a vibraciones de cuerpo entero.

4.2.2 Software para el proceso de los registros de Vibración

Las señales de vibración registradas por los acelerómetros señalados, primero fueron procesadas con el Software Sigview 2.7.1, compensando las desviaciones de su respuesta con las curvas de calibración medidas en laboratorio, aplicadas en forma de filtro digital en el dominio del tiempo. Adicionalmente, en este programa se elimina la componente continua de vibración o aceleración de gravedad, dejando solo las componentes de vibración alternas. Las señales procesadas de cada acelerómetro, se exportan a un formato de texto.

Posteriormente, se utilizó el software MATLAB versión R2016a, para procesar los registros de vibración resultantes, según las ecuaciones (6) a (11) señaladas en el capítulo anterior y obtener los indicadores para la evaluación del riesgo de 2631-5:2004. Adicionalmente, se incorporó al código de programación los procesos de cálculo de ISO 2631-1 para obtener los indicadores de aceleración rms ponderada a_w y Dosis de Vibración VDV.

La validación del resultado del cálculo, se efectuó con una señal teórica indicada en 2631-5:2004 (ver Figura 5), la que fue implementada en Excel y exportada a un formato de texto, para ser luego cargada y procesada en MATLAB. En el Anexo A6, se muestra el resultado del

¹ Metodología establecida en la norma internacional ISO 16063-21: Vibration calibration by comparison to a reference transducer.

cálculo proporcionado por el código de MATLAB desarrollado, comparado con el resultado esperado según la normativa. Un proceso similar fue realizado para validar los resultados de aceleración rms ponderada a_w y dosis de vibración VDV.

4.2.3 Vehículos seleccionados y grupos homogéneos de exposición a vibraciones.

Las mediciones se efectuaron a conductores de los vehículos de transporte de cinco empresas que accedieron a colaborar en este estudio, Ios que se muestran en la Tabla 7, señalando además la zona geográfica, cantidad y tipo de vehículo medido.

Tabla 7.- Lugares de trabajo donde se efectuaron las mediciones, tipos, cantidad de vehículos y tipo de trayecto utilizado.

| Empresa | Ubicación Vehículos | Tipo Vehículo | Cantidad de Vehículos medidos | Tipo de Trayecto |
|--------------------|--|--|--------------------------------------|-------------------------------------|
| <i>Empresa N°1</i> | San José de La Mariquina Decimotercera Región. | Camión Forestal | 9 | Mixto (dentro y fuera de carretera) |
| <i>Empresa N°2</i> | San José de La Mariquina Decimotercera Región. | Camión Forestal | 9 | Mixto (dentro y fuera de carretera) |
| <i>Empresa N°3</i> | San José de La Mariquina Decimotercera Región. | Camión Forestal | 20 | Mixto (dentro y fuera de carretera) |
| <i>Empresa N°4</i> | San Bernardo, Región Metropolitana. | Camión Frigorífico de Placa. | 27 | Calles y autopistas de RM. |
| <i>Empresa N°5</i> | Puente Alto, Región Metropolitana. | Camiones Grúa, Hidroelevador, camionetas y furgones de servicio. | 8 | Mixto (dentro y fuera de carretera) |

Para el total de vehículos y lugares de trabajo medidos, se consideraran dos "Grupos Homogéneos de Exposición", es decir, aquellos puestos donde existe similitud en las condiciones de trabajo (por ejemplo el tipo de vehículo utilizado), tiempos de exposición similares (mismas jornadas y duración de actividades), y condiciones de exposición al agente (trayectos similares), siendo estos grupos de exposición los de "Camiones Forestales" y "Camiones Frigoríficos". Los vehículos de la empresa de energía señalada no constituyen un grupo homogéneo de exposición debido a la multiplicidad de vehículos presentes.

4.2.4 Parámetros para el cálculo de los indicadores de riesgo.

Para poder efectuar el cálculo de los indicadores de evaluación de riesgo a_w y VDV, se debe establecer un tiempo de exposición común para los conductores de vehículos. Según lo consultado en las respectivas empresas y a lo observado durante las mediciones, el tiempo de exposición efectivo es de aproximadamente 6 horas, por lo tanto este será el tiempo utilizado para el proceso de los indicadores señalados.

Adicionalmente, para calcular el indicador R de 2631-5:2004 para predecir la probabilidad de efectos adversos o daño de la columna a través de los años, se asumirá la edad de inicio de la exposición en 30 años, que es la edad observada e informada en los lugares visitados, edad que será proyectada durante 20 años en tramos de cinco años y observar la progresión de un eventual efecto adverso. También se asumirá para la proyección del R que el trabajador se expone 230 días al año.

5. RESULTADOS

El resultado de las mediciones de aceleración vibratoria ponderada a_w , de las Dosis de Vibración VDV y de los valores Sed y R, se muestran desde los Anexos A1 a A5 para cada una de las empresas colaboradoras de este estudio.

También se incorpora en las tablas de resultados, valores en colores y símbolos que facilitan la identificación de aquellos casos que superan o no un límite máximo para a aceleración a_w (DSN°594/1999, 2631-1, 2002/44/CE), otros donde la dosis VDV está bajo un límite de acción, en zona de precaución para la salud, o superando un límite máximo (ISO2631-1:1997, 2002/44/CE), y también aquellos casos donde Sed y R presentan valores con una probabilidad de efectos adversos Baja, Media o Alta (2631-5:2004).

El resultado general para el total de los 73 vehículos medidos, con la evaluación y calificación del riesgo realizada según cada normativa, se muestra en las Figuras 5.1 y 5.2, las que presentan y grafican los resultados de las evaluaciones y su comparación.

En las Figuras 6.1 y 6.2, se muestran los resultados específicos para el grupo de exposición similar de camiones forestales.

En las figuras 7.1 y 7.2, se muestran los resultados específicos para el grupo de exposición similar de camiones frigoríficos.

Figura 5.1- Resultado Evaluación General a_w y VDV.

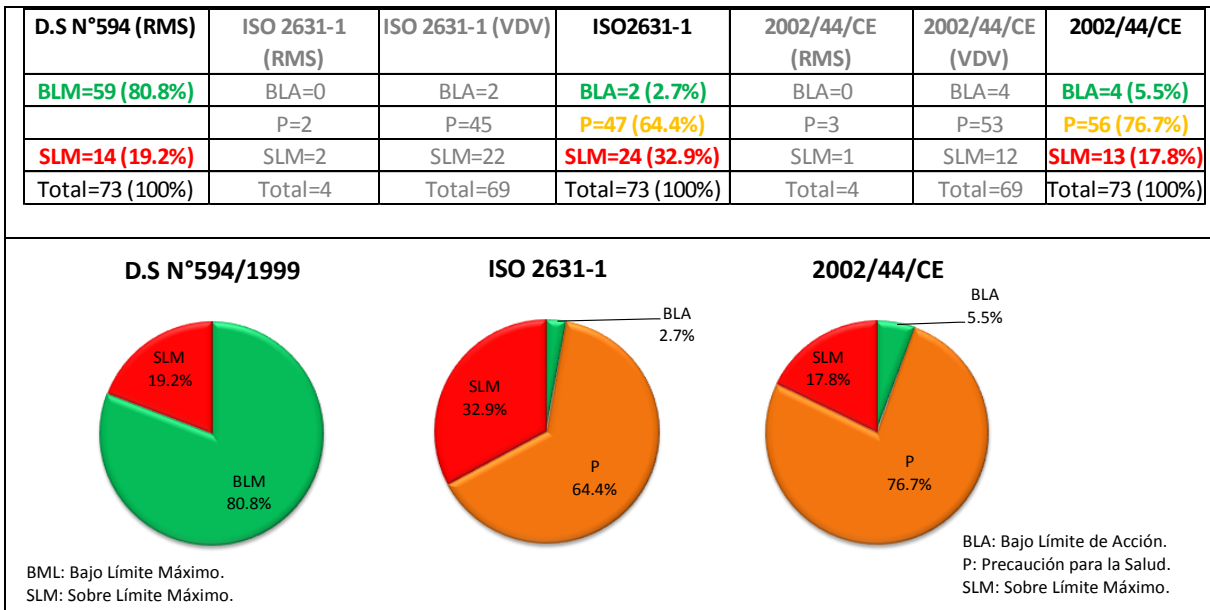


Figura 5.2- Resultado Evaluación General Sed y R.

| ISO 2631-5 (Sed) | ISO 2631-5 (R-5 años) | ISO 2631-5 (R-10 años) | ISO 2631-5 (R-15 años) | ISO 2631-5 (R-20 años) |
|---------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| B=10 (13.7%) | B=57 (78.1%) | B=46 (63%) | B=34 (46.6%) | B=28 (38.4%) |
| M=24 (32.9%) | M=11 (15.1%) | M=21 (28.8%) | M=30 (41.1%) | M=30 (41.1%) |
| A=39 (53.4%) | A=5 (6.8%) | A=6 (8.2%) | A=9 (12.3%) | A=15 (20.5%) |
| Total=73 (100%) | Total=73 (100%) | Total=73 (100%) | Total=73 (100%) | Total=73 (100%) |

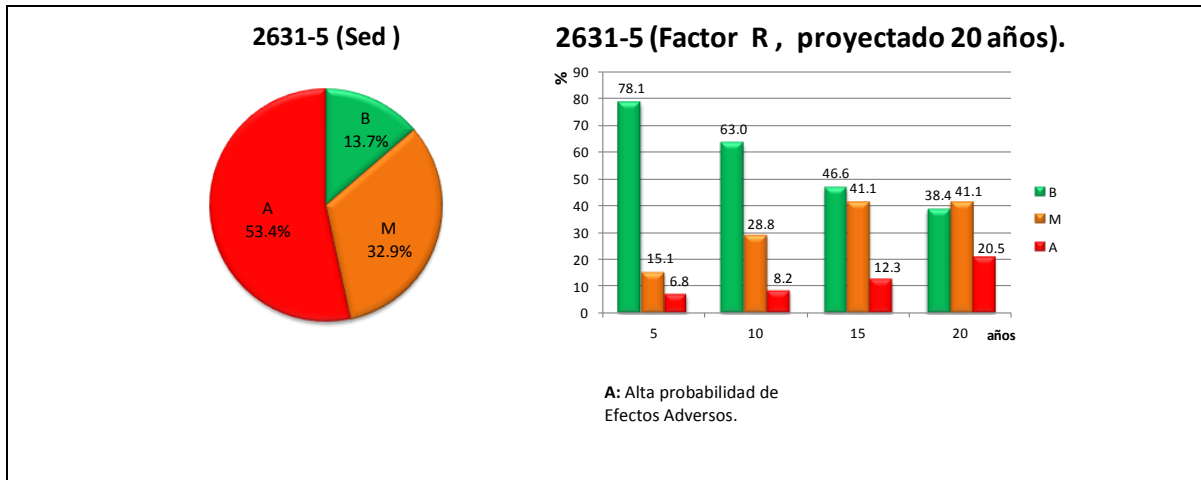


Figura 6.1- Resultado evaluación camiones forestales a_w y VDV.

| D.S N°594 (RMS) | ISO 2631-1 (RMS) | ISO 2631-1 (VDV) | ISO2631-1 | 2002/44/CE (RMS) | 2002/44/CE (VDV) | 2002/44/CE |
|-----------------------|------------------|------------------|-----------------------|------------------|------------------|----------------------|
| BLM=30 (78.9%) | BLA=0 | BLA=0 | BLA=0 (0%) | BLA=0 | BLA=2 | BLA=2 (5.3%) |
| | P=2 | P=24 | P=26 (68.4%) | P=3 | P=25 | P=28 (73.7%) |
| SLM=8 (21.1%) | SLM=2 | SLM=10 | SLM=12 (31.6%) | SLM=1 | SLM=7 | SLM=8 (21.1%) |
| Total=38 (100%) | Total=4 | Total=34 | Total=38 (100%) | Total=4 | Total=34 | Total=38 (100%) |

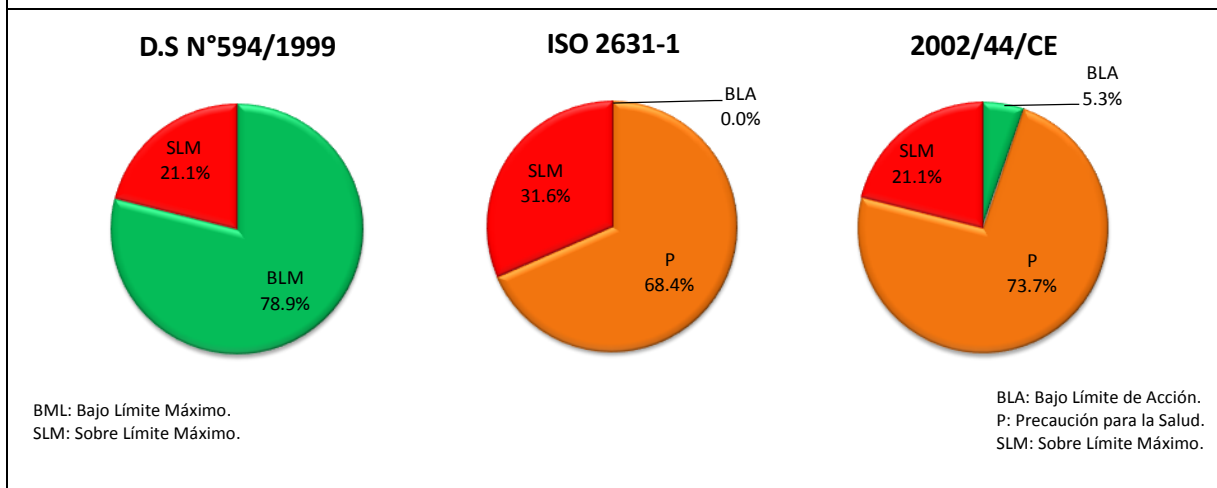


Figura 6.2- Resultado evaluación camiones forestales Sed y R.

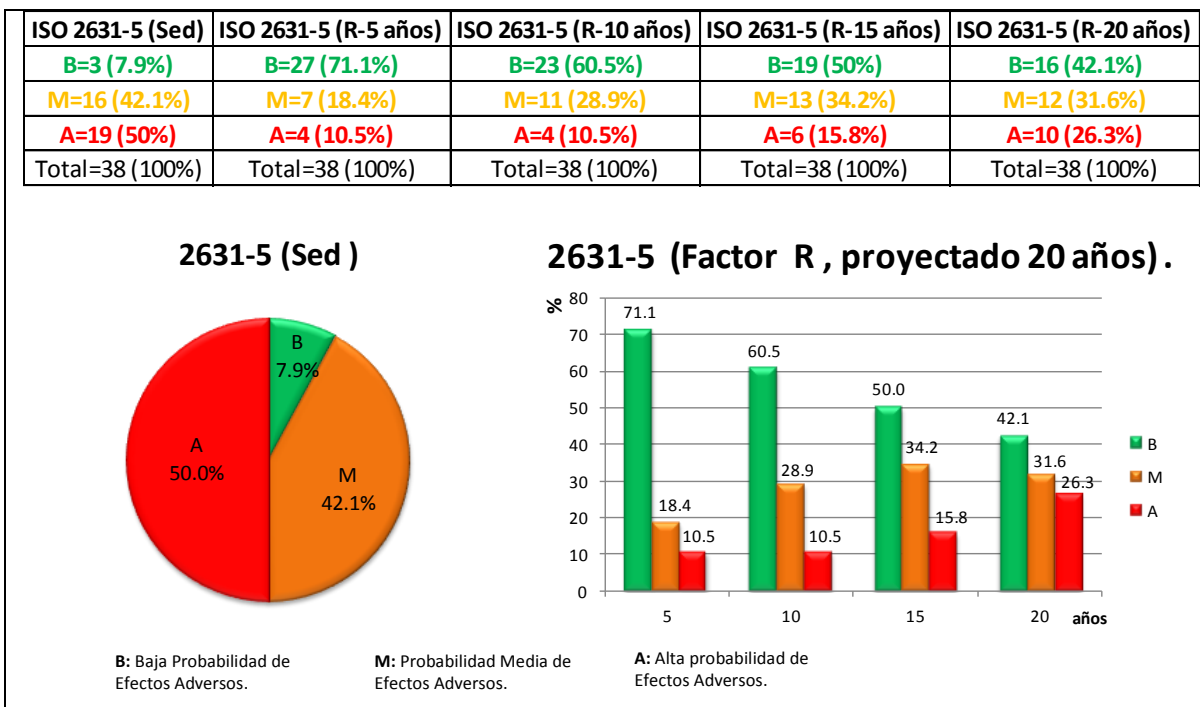


Figura 7.1.- Resultado evaluación rubro camiones frigoríficos a_w y VDV.

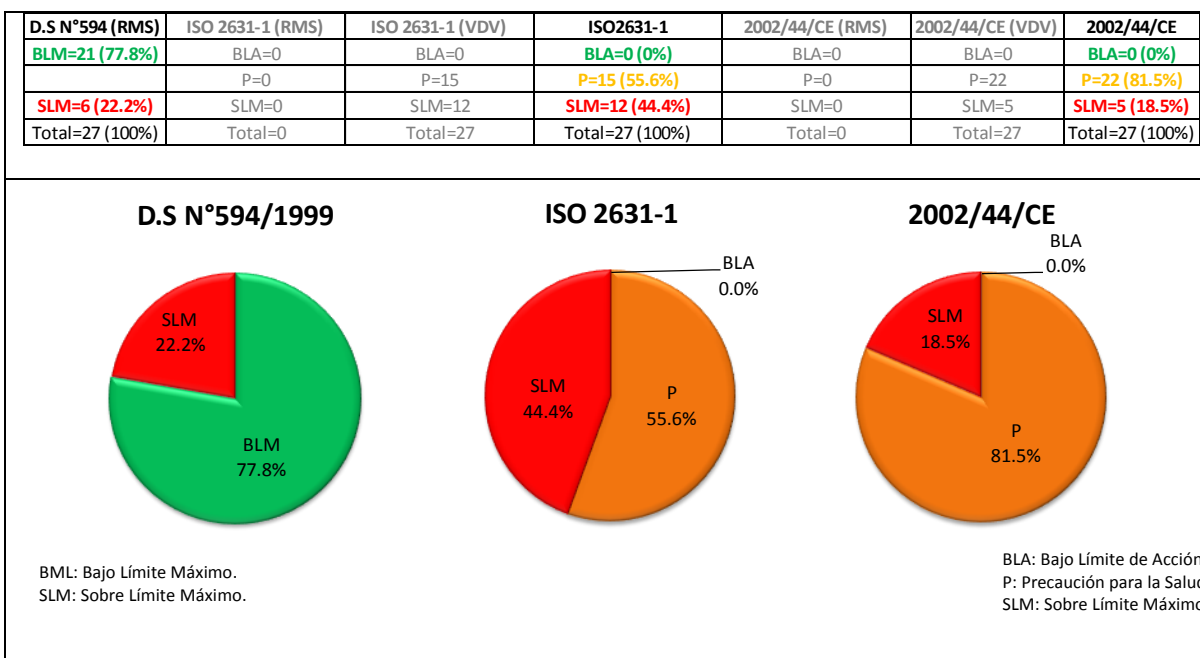
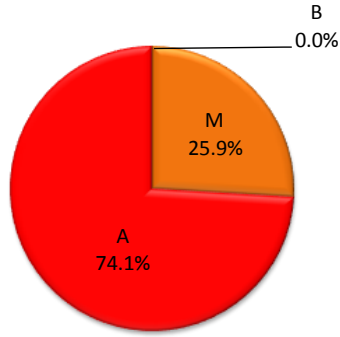


Figura 7.2.- Resultado evaluación rubro camiones frigoríficos Sed y R.

| ISO 2631-5 (Sed) | ISO 2631-5 (R-5 años) | ISO 2631-5 (R-10 años) | ISO 2631-5 (R-15 años) | ISO 2631-5 (R-20 años) |
|---------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| B=0 (0%) | B=22 (81.5%) | B=15 (55.6%) | B=7 (25.9%) | B=4 (14.8%) |
| M=7 (25.9%) | M=4 (14.8%) | M=10 (37%) | M=17 (63%) | M=18 (66.7%) |
| A=20 (74.1%) | A=1 (3.7%) | A=2 (7.4%) | A=3 (11.1%) | A=5 (18.5%) |
| Total=27 (100%) | Total=27 (100%) | Total=27 (100%) | Total=27 (100%) | Total=27 (100%) |

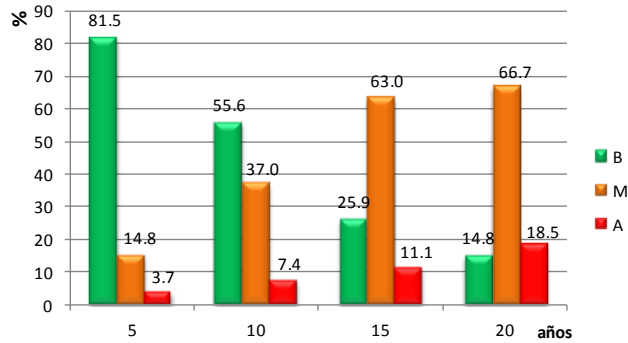
2631-5 (Sed)



B: Baja Probabilidad de Efectos Adversos.

M: Probabilidad Media de Efectos Adversos.

2631-5 (Factor R , proyectado 20 años).



A: Alta probabilidad de Efectos Adversos.

6.- DISCUSIÓN

6.1 Tipo de Vibración Registrada

Del registro y proceso de 73 mediciones de vibración, 69 (94.5%) de ellas resultaron con un factor de cresta superior al valor 9, considerándose que en éstos casos la vibración y exposición de los conductores de los vehículos seleccionados, contienen vibración con componentes impulsivas o con la presencia de múltiples choques². Los cuatro casos de vibraciones medidas que obtuvieron un factor de cresta inferiores al valor 9 son consideradas como vibración estable.

6.2 Respecto a la norma 2631-5:2004.

² Se hace presente que el factor de cresta, en algunas ocasiones podría estar sobrestimado debido a la presencia de valores de vibración peak de tipo accidentales, ocasionados por golpes del acelerómetro, su manipulación u otro motivo que no se deba a la exposición misma que proporciona el vehículo sobre el conductor.

Para el total de 73 casos donde se registro la exposición a vibraciones, el valor calculado de Compresión Estática Equivalente Sed, dio en 39 mediciones (53.4% de los casos), valores sobre de 0.8 MPa, calificando la exposición como con Alta probabilidad de efectos adversos para la salud. En 24 casos, 32.9% del total, el valor de Sed se ubicó entre 0.5 MPa y 0.8 MPa, con una probabilidad "Media"³ de efectos adversos y 10 casos, 13.7% del total los valores de Sed estuvieron bajo 0.5 MPa resultando la exposición con una Baja probabilidad de efectos Adversos (ver Figura 5.2).

El valor R, calculado en función del Sed, según la edad del trabajador en el inicio de la exposición junto con la cantidad de días anuales en el lugar de trabajo, según la figura 5.2, en los primeros 5 años dio 5 casos, 6.8% del total donde se supera el valor de 1.2 de referencia con una alta probabilidad de efectos adversos para la salud predicha. La cantidad de casos en esta categoría aumentaría progresivamente en 1 caso mas a los 10 años, en cuatro casos mas a los 15 años y aumentaría en 10 casos adicionales a los 20 años, pudiendo llegar a involucrara a un 20.5% del total de casos en esta categoría o condición de riesgo.

Los casos donde el R supero el valor de referencia de 0.8, sin sobrepasar 1.2, es decir, aquellas exposiciones calificadas como con una probabilidad "Media" de Efecto adverso, comienza en 11 casos, 15.1% del total, aumentando a los 10 años en 10 casos (28.8%), 9 más a los 15 años (41.1%), conservándose esta condición a los 20 años (ver Figura 5.2).

Según la Figura 5.2, los casos con R inferiores a 0.8, es decir con una Baja probabilidad de efectos adversos, inician con 57 casos, 78.1% del total a los primeros 5 años, para ir disminuyendo a un 63% a los 10 años de exposición, 46.6% a los 15 años y a un 38.4% a los 20 años

Para la evaluación de la exposición en el grupo de exposición similar los camiones forestales, y según lo observado en la Figura 6.2, para el total de 38 lugares de trabajo estudiados, el valor de Sed, en 19 mediciones, 50% de los casos, superó el valor de 0.8 MPa, con Alta probabilidad de efectos adversos para la salud. En 16 casos, 42.1% del total, el valor de Sed se ubicó entre 0.5 MPa y 0.8 MPa, con una probabilidad "Media"⁴ de efectos adversos y 3 casos, 7.9% del total los valores de Sed estuvieron bajo 0.5 MPa resultando la exposición con una Baja probabilidad de efectos Adversos (ver Figura 6.2). Para el valor R calculado y proyectado desde 5 a 20 años, la cantidad de casos con Baja probabilidad de efectos adversos parte en 71.1% en los 5 años y cae a un 60.5% a los 10 años, 50% a los 15 años y a un 42.1% a los 20 años de proyección (ver Figura 6.2).

Para la evaluación de la exposición en el grupo de exposición similar de camiones frigoríficos, y según lo observado en la figura 7.2, para el total de 27 lugares de trabajo estudiados, el valor de Sed, en 20 mediciones, 74.1% de los casos, superó el valor de 0.8 MPa, con Alta probabilidad de efectos adversos para la salud. En 7 casos, 25.9% del total, el valor de Sed se ubicó entre 0.5 MPa y 0.8 MPa, con una probabilidad "Media" de efectos adversos y ningún caso estuvo bajo 0.5 MPa con una Baja probabilidad de efectos Adversos. Para el valor R calculado y proyectado desde 5 a 20 años, la cantidad de casos con Baja probabilidad de

³ Denominación asignada en este trabajo.

⁴ Denominación asignada en este trabajo.

efectos adversos parte en 81.5% en los 5 años, cayendo a un 55.6% a los 10 años, 25.9% a los 15 años y a un 14.8% a los 20 años de proyección (ver Figura 7.2).

6.3 Respecto a la norma base ISO2631-1:1997.

Para esta normativa, de la cual se derivan el D.S. N°594/1999 y la Directiva 2002/44/CE, de los 73 casos medidos, 69 presentaron factores de cresta FC que superaron el valor 9, establecido como criterio para definir que estas exposiciones se evalúen con el indicador de Dosis de Vibración VDV en vez de usar el indicador aceleración rms ponderada, a_w , asumiendo que estas exposiciones contienen componentes impulsivas. Cuatro mediciones, correspondientes a las mediciones N°5, N°22, N°24 y N°26 (ver Anexos), obtuvieron factores de cresta FC inferiores al valor 9, asumiendo una característica estable de vibración, utilizándose para la evaluación el indicador de aceleración rms ponderada a_w .

De un total de 73 vehículos de transporte donde se registro vibración impulsiva (69) y continua (4), en 24 de ellos, 32.9% del total, se presentó exposición a vibración que Superó el Límite Máximo Permisible "SLM" de esta norma, para un tiempo de exposición de 6 horas diarias. Luego, 47 casos, 64.4% del total, obtuvieron valores de vibración dentro de la zona de precaución "P". Finalmente, 2 casos, 2.7% del total, obtuvieron vibraciones "Bajo el Limite de Acción" Ocupacional "BLA", con escaso nivel de riesgo.

Para el grupo de exposición similar "camiones forestales", conformado por un total de 38 vehículos, en 12 de ellos, 31.6% del total, se presentó exposición a vibración que Superó el Límite Máximo Permisible "SLM" de esta norma para un tiempo de exposición de 6 horas diarias. Luego, 26 casos, 68.4% del total, obtuvieron valores de vibración dentro de la zona de precaución "P". No se presentaron casos con vibración "Bajo el Límite de Acción" Ocupacional, "BLA".

Para el grupo de exposición similar "camiones frigoríficos", conformado por un total de 27 vehículos, en 12 de ellos, 44.4% del total, se presentó exposición a vibración que Superó el Límite Máximo Permisible "SLM" de esta norma para un tiempo de exposición de 6 horas diarias. Luego, 15 casos, 55.6% del total, obtuvieron valores de vibración dentro de la zona de precaución "P". No se presentaron casos con vibración "Bajo el Límite de Acción" Ocupacional "BLA".

Para los lugares de trabajo de la Empresa N°5 del rubro "Energía", que no constituye grupo de exposición similar, los resultados de la medición y evaluación se muestran en el Anexo a5 y muestran una exposición moderada con dos casos (25%) bajo el límite de Acción y seis casos calificados con Precaución para la Salud (75%).

6.4 Respecto a la Directiva 2002/44/CE.

Para esta normativa, de uso obligatorio en los países miembros de la Comunidad Europea, la evaluación de la exposición se efectúa de la misma forma que la realizada con la norma ISO2631-1:1997, con tres estados de exposición dependiendo si se supera el límite de acción LA, si el valor está entre el LA y el límite máximo permisible LMP, o si se supera el LMP. Por otra parte, para seleccionar el indicador de evaluación a_w o VDV, se utiliza el factor de cresta FC, dependiendo si éste es menor o mayor a 9, respectivamente.

De los 69 vehículos con vibración impulsiva o múltiples choques y 4 con vibración continua, 13 casos 17.8 % del total, presentó exposición a vibración que Superó el Límite Máximo Permisible "SLM" de esta norma, para un tiempo de exposición de 6 horas diarias. Luego, 56 casos, 76.7% del total, obtuvieron valores de vibración dentro de la zona de precaución "P". Finalmente, 4 casos, 5.5% del total, obtuvieron vibraciones "Bajo el Limite de Acción" Ocupacional "BLA". Como esta normativa propone tomar medidas preventivas y de control de la exposición para todos los que superen el límite de acción, el porcentaje cubierto de trabajadores dentro de un programa de prevención de salud sería la suma de 17.8% sobre el límite máximo mas el 76.7% sobre el límite de acción, cubriendo al 94.5% de los trabajadores.

Para el grupo de exposición similar "camiones forestales", 38 vehículos, en 8 de ellos, 21.1% del total, se presentó exposición a vibración que Superó el Límite Máximo Permisible "SLM" de esta norma para un tiempo de exposición de 6 horas diarias. Luego, 28 casos, 73.7% del total, obtuvieron valores de vibración dentro de la zona de precaución "P" y 2 casos 5.3% del total presentó vibración "Bajo el Límite de Acción" Ocupacional, "BLA".

Para el grupo de exposición similar "camiones frigoríficos", 27 vehículos, en 5 de ellos, 18.5% del total, se presentó exposición a vibración que Superó el Límite Máximo Permisible "SLM" para un tiempo de exposición de 6 horas diarias. Luego, 22 casos, 81.5% del total, obtuvieron valores de vibración dentro de la zona de precaución "P". No se presentaron casos con vibración "Bajo el Límite de Acción" Ocupacional "BLA".

Para los lugares de trabajo de la empresa de energía, que no constituye grupo de exposición similar, los resultados de la medición y evaluación se muestran en el Anexo A5.

6.5 Respecto al D.S. N°594/1999.

De los un total de 73 vehículos de transporte donde se registro la exposición a vibraciones de su conductor, en 14 de ellos, 19.2% del total, se presentó exposición que Superó el Límite Máximo Permisible "SLM" para un tiempo de exposición de 6 horas diarias. Las 59 exposiciones restantes, 80.8% de los casos, obtuvieron una calificación de "Bajo el Limite" permisible "BL", tal como se observa en la Figura 5.1 de Evaluación General. El carácter obligatorio de la aplicación de esta normativa en Chile, obligaría a adoptar acciones preventivas y/o de control de la exposición para el 19.2% de los casos donde se superó el límite, sin embargo para el 80.8%, no se adoptan medidas preventivas o de control, asumiendo la ausencia de una condición de riesgo.

Para el grupo de exposición similar "camiones forestales", conformado por un total de 38 vehículos, un 21.1% (8 de ellos) obtuvo una exposición "Sobre el Límite Máximo" permisible

"SLM", quedando el 78.9% (30 restante) con una exposición Bajo el Límite Máximo "BLM", tal como se muestra en la Figura 6.1.

Para el grupo de exposición similar "camiones frigoríficos", conformado por un total de 27 vehículos, un 22.2% (6) de los casos obtuvo una exposición Sobre el Límite permisible "SL", quedando el 77.8% (21) restante con una exposición Bajo el Límite "BL", tal como se muestra en la Figura 7.1.

La cantidad de casos sobre y bajo el límite permisible para cada empresa y lugar de trabajo en particular, se puede observar en las tablas de resultados de los Anexos A1 a A5.

6.6 Comparación Evaluación del D.S. N°594/1999 con las otras Normativas.

Si se compara el resultado de una evaluación obtenida mediante el D.S.N°594/1999, con el que se obtiene con la Directiva 2002/44/CE, también de carácter legal obligatorio, el primero dispone solo de dos estados "sobre" o "bajo" el Límite Máximo Permisible, cuando el segundo utiliza tres estados, "bajo el límite de acción", un estado intermedio de "Precaución para la Salud" y "Sobre el Límite Máximo", basado en la presencia comprobada de enfermedad profesional en el rango entre el límite acción y el límite máximo. Otra diferencia es que la directiva 2002/44/CE utiliza el índice VDV, proporcional a cuarta potencia de la aceleración, diferenciándose significativamente del a_w , proporcional al cuadrado de la aceleración, único indicador disponible en el D.S. N°594/1999 de Chile. Esto explica que cuando hay 59 casos bajo el límite máximo "BLM" y 14 casos sobre el límite SLP para el D.S.N°594/1999, la otra normativa (2002/44/CE) presentó 13 casos sobre su límite máximo SLM y 56 sobre el límite de acción, dado que con la dosis de vibración VDV se pondera de manera importante las vibraciones asumidas como impulsivas, a la cuarta potencia de la aceleración, dejando solo 4 casos bajo el límite de acción "BLA". Tal como se indicó en 7.4, mientras la directiva 2002/44/CE obligaría a adoptar acciones preventivas y de control sobre el 94.5% de los lugares de trabajo seleccionados (17.8% Sobre Límite Máximo y 76.7% entre el límite de acción y límite máximo), el D.S. N°594/1999 cubriría un 19.2% de los casos con medidas de tipo preventivas y de control.

Si se compara el resultado de una evaluación obtenida mediante el D.S.N°594/1999, con el que se obtendría con la norma ISO2631-1:1997, de tipo referencial, sucede algo similar que lo indicado en el párrafo anterior para la directiva 2002/44/CE, con la diferencia que la norma ISO2631-1:1997 propone una zona de precaución de la salud definida por parámetros menores, resultando un porcentaje mayor de casos calificados sobre el límite de acción y sobre el límite máximo. Para los 59 casos bajo el límite BL y 14 casos sobre el límite LMP para el D.S.N°594/1999, la normativa ISO2631-1:1997 presentó 24 casos sobre su límite máximo SLM, 47 sobre el límite de acción y 2 casos bajo el límite de acción BLA. De manera similar, dado que la evidencia que se presenta en esta normativa sugiere adoptar acciones preventivas a partir del límite de acción, se cubriría un 97.3% de los lugares de trabajo seleccionados (32.9% Sobre el Límite Máximo y 64.4% entre el límite de acción y límite máximo), mientras que el D.S. N°594/1999 cubriría un 19.2% de los casos con medidas de tipo preventivas y de control.

Si se compara el resultado de la evaluación obtenido a partir del a_w del N°594/1999 con el obtenido a partir del Sed de 2631-5:2004 (Sed), ambos considerados para evaluar la condición del riesgo "actual" o diaria, se obtiene que mientras el D.S. N°594/1999 obtuvo 14 casos (19.2%) sobre el límite SLM, la Norma 2631-5:2004 entregó un 86.3% de casos en una condición de riesgo para la salud o con una probabilidad "Media" y "Alta" de adquirir un efecto adverso, esto es considerando todos los casos donde el Sed entre 0.5 MPa y 0.8 MPa y superiores a 0.8 MPa.

Bajo el supuesto que la exposición medida, se inicia para un conductor a sus 30 años de edad, con una exposición diaria de 6 horas, 230 días anuales de conducción y con el valor de Sed calculado, el factor R, adopta progresivamente mayor cantidad de casos sobre el valor de 0.8 (baja probabilidad un efecto adverso) y sobre el valor de 1.2 (alta probabilidad de un efecto adverso), alcanzando a los 20 años una cantidad de casos sobre el límite máximo propuesto por esta normativa de vibración de impacto, similar a los 14 casos sobre el LMP con el D.S. N°594/1999. Desde el punto de vista preventivo, cuando el D.S. N°594/1999 cubre el 19.2% de los casos con un programa de prevención y control, esta otra normativa lo haría con un porcentaje similar a los 5 años (21.9%), subiendo el porcentaje cubierto a un 37 % a los 10 años, a un 53.4% a los 15 años y a un 61.6% a los 20 años.

7.- CONCLUSIONES

Se logró implementar un sistema de registro y medición de terreno para efectuar la evaluación establecida en 2631-5:2004 y de manera simultánea para el D.S.N°594/1999, ISO2631-1:1997 Y DIRECTIVA 2002/44/CE, los que fueron validados con instrumentación de referencia en laboratorio.

Para el proceso de los registros y obtener de ellos, de manera simultánea, el valor de los indicadores requeridos por las normas señaladas, se utilizó el software de procesamiento de señales Sigview 2.7.1, y se implementó un código para MATLAB, que permite el cálculo de los indicadores Sed y R para la evaluación del riesgo y predicción del daño en columna vertebral.

De los 73 casos o vehículos de transporte seleccionados, 69 (94.5%) se establecieron con presencia de vibración impulsiva o de impacto según el criterio de las normas ISO2631-1:1997 y directiva 2002/44/CE, mediante el indicador factor de cresta (>9). De los cuatro casos con factores de cresta inferiores a 9, considerados con vibración "estable", para la norma 2631-5:2004 resultaron con presencia de vibración impulsiva con valores Sed que implican una Alta probabilidad de efectos Adversos.

Según los resultados obtenidos, mientras la directiva 2002/44/CE obligaría a adoptar acciones preventivas y de control sobre el 94.5% de los lugares de trabajo seleccionados, trabajadores con exposición sobre el Límite Máximo 17.8% y entre el límite de acción y límite máximo 76.7%, el D.S. N°594/1999 cubriría un 19.2% de los casos con medidas de tipo preventivas. Algo similar ocurre con la Norma ISO 2631-1, que cubriría con acciones preventivas, un 97.3% de los casos medidos.

La evaluación según el indicador "Sed" de la norma 2631-5:2004, cubriría un 86.3% de los casos con alguna probabilidad de efectos adversos en la salud y el factor R, proyectado a 5 años, predice una condición adversa con una cantidad de trabajadores cubiertos en un plan preventivo similar al que obtuvo el D.S. N°594/1999, aunque los indicadores utilizados a_w y R no son comparables.

La comparación de los resultados de la evaluación del D.S N° 594/1999 con las otras normativas planteadas, implica que la legislación nacional subestima significativamente el riesgo de la exposición a vibraciones para el conjunto de lugares de trabajo seleccionados cuando en la exposición se presentan vibraciones impulsivas o de múltiples choques. Lo anterior, principalmente por no considerar el DS N°594/1999, al menos un indicador específico para ponderar el efecto y riesgo de la vibración impulsiva en la exposición, como la dosis de vibración VDV de ISO2631-1:1997 y directiva 2002/44/CE, o el indicador Sed y R de la norma 22631-5 y por otro lado, por no considerar acciones preventivas y de control a partir de un valor umbral o "límite de acción" fijado según la evidencia de manifestación de lesiones o enfermedades profesionales.

8.- RECOMENDACIONES Y TRABAJO A FUTURO.

Se recomienda, incorporar en una futura legislación nacional, indicadores como la Dosis de Vibración VDV, o similares para caracterizar la exposición a vibración que contenga componentes impulsivas y que permita aproximarse de mejor forma a determinar la condición de riesgo en un lugar de trabajo y luego definir adecuadamente las medidas preventivas de salud y técnicas factibles.

Dado que el factor de cresta FC es calculado en función del máximo peak presente en el periodo de medición, se recomienda implementar un indicador estadístico del peak que refleje su tendencia, para evitar sobreestimar el carácter impulsivo de la vibración, cuando ocurren aceleraciones peak accidentales o debidas a otros factores distintos de la exposición a la vibración del vehículo o fuente de vibración.

Extender, las mediciones y la evaluación respectiva a otros lugares de trabajo donde exista presencia de vibración impulsiva, para caracterizar la exposición por medio de los indicadores disponibles y evaluar el riesgo.

La efectividad de las herramientas de medición y evaluación de terreno están diseñadas en función del efecto que el agente y su magnitud tienen sobre las personas, por lo que los planes de vigilancia de la salud y las implementaciones de las medidas técnico-administrativas que se puedan realizar en terreno son fundamentales para, de manera preventiva, anticipar una lesión o enfermedad profesional debido a este agente. Chile, no dispone de sistemas de vigilancia de la salud que complementen la vigilancia ambiental, dificultando enfocar los esfuerzos de control y reevaluación de los lugares de trabajo.

9.- AGRADECIMIENTOS

Se agradece sinceramente la participación y contribución de las personas y empresas que se indican a continuación:

- Sr. Luis Orellana Andrade y su colaboración en la gestión de mediciones efectuadas en empresas Keylogistics Chile S.A. y Empresa Eléctrica Puente Alto.
- Sr. Pablo Salgado Gómez, Experto en Prevención de Riesgos de la **Empresa Forestal Nahuelbuta Ltda.**
- Sr Emerson Oporto X, Experto en Prevención de Riesgos de la Empresa **Servicios Forestales Katango Ltda.**
- **Juvenal Ortiz X**, Experto en Prevención de Riesgos de la Empresa **Transvía Forestal Ltda.**

10.- REFERENCIAS

- [1] D.S. 594/1999 Reglamento Sobre Condiciones Sanitarias y Ambientales básicas en los Lugares de Trabajo, Ministerio de Salud, 1999.
- [2] ISO 2041:1990, Vibration and Shock – Vocabulary.
- [3] Comisión Europea, Guía no vinculante sobre buenas prácticas para la aplicación de la Directiva 2002/44/CE, Oficina de Publicaciones Oficiales de las Comunidades Europeas, Luxemburgo 2008, ISBN 978-92-79-07534-6.
- [4] Directiva 2002/44/CE, Disposiciones Mínimas de Seguridad y de Salud Relativas a la Exposición de los Trabajadores a los Riesgos Derivados de los Agentes Físicos, vibraciones, Parlamento Europeo, Decimosexta Directiva, 25 de junio de 2002, Diario Oficial L 177 de 6.7.2002.
- [5] Protocolo para la aplicación del D.S. N°594/1999 del MINSAL, Título IV, párrafo 3° Agentes Físicos – Vibraciones, año 2006.
- [6] Guidelines for Whole-Body Vibration Health Surveillance, Vibration Injury Network, EC Biomed II concerted action BMH4-CT98-3251, Appendix W1E to Final Report May 2001.

- [7] Superintendencia de Pensiones Ministerio del Trabajo y Previsión Social, Universidad de Chile - Facultad de Medicina, Guía Técnica para la Evaluación del Trabajo Pesado, 2010 Santiago, Chile.
- [8] Bruce P. Bernard, M.D., M.P.H., Musculoskeletal Disorders and Workplace Factors, A Critical Review of Epidemiologic Evidence for Work-Related Musculoskeletal Disorders of the Neck, Upper Extremity, and Low Back, U.S. DEPARTMENT OF HEALTH AND HUMAN SERVICES, 1997.
- [9] ISO 2631-5:2004 Mechanical vibration and shock -- Evaluation of human exposure to whole-body vibration -- Part 5: Method for evaluation of vibration containing multiple shocks
- [10] Wenping WANG, Babak BAZRGARI, Biodynamic Response and Spinal Load Estimation of Seated Body in Vibration Using Finite Element Modeling , 1Department of Mechanical Engineering, Ecole Polytechnique, C.P. 6079, Succ centre-ville, Montreal, 2010.
- [11] Gerd HUBER, Daniel M. SKRZYPIEC, High Cycle Fatigue Behaviour of Functional Spinal Units, Institute of Biomechanics, TUHH Hamburg University of Technology, Denickestrasse 15, 21073 Hamburg, Germany, 2010.
- [12] Yi QIU and Michael J. GRIFFIN, Biodynamic Response of the Seated Human Body to Single-axis and Dual-axis Vibration: Effect of Backrest and Non-linearity, Human Factors Research Unit, Institute of Sound and Vibration Research, University of Southampton, Southampton SO17 1BJ, United Kingdom, 2012.
- [13] International Organization for Standardization ISO 2631-1 (1997). Evaluation of human exposure to whole-body vibration. Part. 1: General Requirements. International Organization Standardization (ISO), Geneva, Switzerland.