

# ESTIMACIÓN DE EXPOSICIÓN A VIBRACIONES DE EQUIPO MILITAR TRANSPORTADO EN VEHÍCULOS A RUEDA

*Fecha de recepción:* 28 de diciembre de 2019.

*Fecha de aceptación:* 28 de febrero de 2020.

CAP. Carlos Biolley Menzel<sup>1</sup>

**Resumen:** en el marco del transporte de equipo militar, en algunas situaciones el personal militar debe manipular y transportar sobre caminos irregulares, equipos y armamento delicados como misiles o armas guiadas, exponiéndolos a niveles de vibración que varían según la rugosidad del terreno y la velocidad del vehículo. Esta investigación explora cuáles son los niveles de vibración reales a los que están expuestas dos réplicas de municiones en cajas de madera durante el transporte en vehículos a ruedas. Se utilizó una plataforma a base de un sistema de actuadores para emular la estimulación del terreno hacia un Land Rover L110, a diferentes velocidades y perfiles de rugosidad del terreno. Los resultados muestran que los niveles de exposición a la vibración en la carga son considerablemente más bajos que los estándares de fabricación, lo que significa que no hay restricciones en las velocidades de conducción. En consecuencia, se calculó una aproximación para disminuir el estándar. Finalmente, existe evidencia de que las condiciones de carga afectan la transferencia de vibración, logrando una disminución en las amplitudes de la densidad espectral de potencia en la superficie de carga.

**Palabras clave:** vibración, aislamiento, equipamiento militar, transporte, embalaje, normas, dinámica del vehículo.

**Abstract:** regarding transport of military equipment, in some situations military personnel must manipulate and transport delicate equipment and weapons such as missiles or guided weapons on irregular roads, exposing them to vibration levels that vary according to the roughness of the terrain

---

<sup>1</sup> Ingeniero Politécnico Militar en Sistemas de Armas, mención Municiones, Propelentes y Explosivos de la Academia Politécnica Militar del Ejército de Chile. Magister en Tecnología de Vehículos Militares de la Universidad de Cranfield, Reino Unido. Jefe de Planificación del CI2D del Comando de Industria Militar e Ingeniería del Ejército de Chile. Santiago, Chile. Email: cbiolley@acapomil.cl



*and the speed of the vehicle. This research explores what the real vibration levels are that two wood-boxed dummy weapons are exposed to during transport in wheeled vehicles. A platform based on actuators system was used to emulate the stimulation of the terrain towards a Land Rover L110, at different speeds and roughness profiles of the terrain. The results show that the levels of exposure to vibration in the payload are considerably lower than the manufacturing standards, which means that there are no restrictions on driving speeds. Consequently, an approximation to lower the standard was calculated. Finally, there is evidence that loading conditions affect the vibration transfer, achieving a decrease in the amplitudes of the power spectral density in the loading surface.*

**Keywords:** vibration, isolation, military equipment, transport, packaging, standards, vehicle dynamics.

## 1. INTRODUCCIÓN

El equipo militar está diseñado y fabricado para desempeñarse en condiciones difíciles y seguir siendo confiable para el momento preciso en que se necesita. Esto es esencial para el cumplimiento de la misión, en donde muchas veces la vida humana depende de ello. Lo anterior implica una mayor calidad de los componentes de los equipos militares para lograr un cierto nivel de confiabilidad, aumentando los costos de producción.

Durante su uso, el equipo debe someterse entre otros a: golpes, impactos, altas aceleraciones, condiciones de flexión, condiciones de materiales abrasivos, exposiciones a temperaturas extremas y exposiciones a vibraciones. La última es la amenaza más común que está presente en el servicio del sistema de armas (SA). Esto se debe al transporte y operación del equipo, ya sea en situaciones administrativas o de empleo en combate.

Con la tecnología en constante evolución en los ámbitos de defensa y civil, algunos sistemas de armas requieren contar con sofisticados sensores y procesadores que se someten a condiciones extremas. Además, es lógico asociar explosivos y materiales energéticos, que deben activarse solo cuando sea necesario, superando todas las excitaciones externas del medioambiente.

Al fabricar sistemas de armas, el fabricante debe considerar todos los estándares internacionales para equipos militares como STANAG,<sup>2</sup> Military Standard<sup>3</sup> y British

---

2 Standardization Agreement (STANAG, en español "Acuerdo de Normalización") define procesos, procedimientos, términos y condiciones de equipamiento o procedimientos y técnicas militares comunes entre los países miembros de la OTAN.

3 Estándar de defensa de Estados Unidos, a menudo llamado estándar militar, "MIL-STD", "MIL-SPEC" o "MilSpecs", se utiliza para ayudar a lograr los objetivos de estandarización del Departamento de Defensa de Estados Unidos.



Standard,<sup>4</sup> entre otros. En esos documentos se detalla la duración bajo la cual las pruebas deben aplicarse al dispositivo que se diseñará, producirá o controlará.

Dichos estándares se establecieron hace décadas, con la tecnología y las capacidades de prueba de esa época. La intención de la norma es asegurar la resistencia a ambientes hostiles que permitan la confiabilidad del sistema. La exigencia extrema de los estándares, hacen que el diseño y la producción de equipos militares sean más costosos.

Con respecto a las pruebas asociadas a los estándares, específicamente la prueba de vibración para transportar equipos militares, es un hecho que los niveles de vibración deben ser superiores a los de operación del equipo. Sin embargo, surgen algunas preguntas como: ¿Cuál es el contraste entre los niveles estándar de vibración y la exposición real a la vibración? ¿Estamos exagerando los estándares de fabricación del equipo? ¿Podemos bajar los estándares y aún tener equipos confiables?

En resumen, es necesario investigar los efectos que la exposición a la vibración tiene en el equipo militar durante el transporte y tener respuestas para preguntas como: ¿cuáles son los niveles de exposición a la vibración en un dispositivo cuando se transporta por carretera en mal estado? En estas condiciones, ¿superamos los estándares?, ¿existe una exageración extrema cuando consideramos los estándares militares?

## **2. REVISIÓN DE LA LITERATURA**

Dentro de los aspectos a revisar en la literatura, se analizaron tópicos asociados a estándares de transporte, empaquetamiento, sensibilidad de equipo militar, aislamiento y amortiguación de vibraciones, dinámica de vehículos a rueda, emulación de conducción, entre otros.

### **2.1. Factor de fragilidad**

Existen diferentes tipos de riesgos contra la carga. Los riesgos mecánicos incluyen específicamente aplastamientos, impactos de caídas y vibraciones, que pueden dañar visiblemente el artículo o equipo. La vulnerabilidad del equipo bajo estos riesgos mecánicos se puede medir como la fragilidad (Ministry of Defence, 2013).

---

4 British Standards Institution, BSI o BSI Group, es una multinacional, cuyos objetivos principales se incluyen la certificación, auditoría y formación en las normas para estandarizar procesos.



FACTOR G	CLASIFICACIÓN DE EQUIPO
20-40	Equipo electrónico/mecánico frágil
40-60	Instrumentación general de equipos de laboratorio
60-80	Equipos electrónicos generales de laboratorio
80-100	Equipo electrónico/mecánico producido en masa
Más de 100	Equipo mecánico robusto

Tabla N° 1: Factores de fragilidad.

Fuente: Elaboración propia.

Los equipos se someten a varias pruebas mecánicas, pero las pruebas ambientales que se recomiendan como mínimo, son la prueba de caída o choque, la prueba de rebote y la prueba de vibración.

Con respecto a la vibración, es el movimiento repetitivo transmitido definido por la amplitud (desviación máxima de la posición de reposo, generalmente medido en *mm*) y la frecuencia (movimientos repetidos por unidad de tiempo generalmente medidos en hercios al cuadrado [*hz<sup>2</sup>*]) (British Standard, 2013) que es inducido por alguna vibración mecánica continua, generalmente las producidas por el motor; y en el caso de los vehículos a rueda, el efecto de las irregularidades del terreno.

De lo anterior se desprenden dos tipos de artículos, robustos y frágiles.

## 2.2. Norma de exposición a vibraciones

De acuerdo con el AECTP 400 de STANAG (NATO, 2006), que describe las pruebas ambientales mecánicas, existen tres espectros de frecuencia relacionados con la vibración debida al transporte. Las pruebas están relacionadas a transportes comunes con vehículos a rueda, sobre todo tipo de terrenos en un vehículo con ruedas táctico, y, en un remolque de dos ruedas.

Cada espectro especifica los niveles para los tres ejes: vertical, longitudinal y transversal. Las fuerzas de frenado y los movimientos de rodadura están relacionados con los ejes longitudinal y transversal respectivamente. El eje vertical implica amplitudes más altas que las otras dos debido a la rugosidad de la superficie, donde existe una gran diferencia de amplitud entre la carretera y los espectros todo terreno.

Una observación importante que hacer radica en que, dentro de los espectros vistos, no se consideran frecuencias por debajo de 5 Hz. Por lo tanto, para esta investigación supondrá que la exposición a esas frecuencias no tiene más implicaciones para el equipo



militar. Sin embargo, se considerará y discutirá una prueba basada en la aceleración a bajas frecuencias para el embalaje (British Standard, 2013).

Por otro lado, el Estándar de Defensa Def Stan 035 (Defence Standard, 2018), describe cuatro formas de probar el material a transportar en vehículos con ruedas en el eje vertical:

- Carga restringida, en carretera.
- Carga restringida, todo terreno y carretera degradada.
- Material desplegado, en carretera.
- Material desplegado, todo terreno y carretera degradada.

La prueba describe que el equipo a probar debe resistir diferentes lapsos de tiempo bajo estos espectros y permanecer operativo, sin fallas evidentes tras la exposición. Esto generalmente se logra conectando el dispositivo a un sistema de agitación, excitándolo bajo los espectros de frecuencia dados.

Cabe mencionar que los puntos de contacto con la plataforma, y por tanto, los modos de resonancia, generalmente no coinciden con la forma correcta de operar el equipo (Daborn, 2014). Esto significa que los puntos de contacto no siempre son óptimos, lo que implica modos naturales de vibración incorrectos del equipo.

### **2.3. Problemas debidos a la sobre exposición a equipos delicados**

Cuando exponemos el equipo militar a altos niveles de vibración esperamos que el equipo permanezca operativo y confiable. Esa es la razón de los estándares exagerados para la fabricación. Sin embargo, hay tipos de equipos que son más delicados y necesitan un sistema de empaque especial que les permita superar la exposición a las vibraciones, como son los misiles y explosivos.

La alta tecnología involucrada en los buscadores de los misiles, donde consideran componentes optrónicos, sensores y placas de circuitos, los hace muy sensibles a fallas pequeñas. Una desalineación en un sensor podría significar un fallo de encendido en el misil, resultando en un sistema de arma inoperable antes del empleo.

Los explosivos primarios deben ser lo suficientemente sensibles para iniciar la reacción en cadena que permite iniciar el tren explosivo. Cada sistema de armas considera esos iniciadores. Por esa razón, las condiciones que deben superar están bien estandarizadas, principalmente en estándares relacionados con sistemas de espoletas (NATO, 2018). El explosivo mismo seguirá siendo sensible, lo que lo aísla es el diseño del empaque.



¿Qué pasa si el embalaje apropiado no está disponible? Es un caso donde la vibración se convierte en un problema en el transporte.

Además, la fragmentación interna y los cambios en la estructura del grano en explosivos secundarios, afectan el rendimiento de la detonación de la cabeza de guerra (Lloyd, 1998). Sin el aislamiento adecuado, esta fragmentación se puede producir por la exposición a la vibración en modo de resonancia, causando fallas en la consistencia y continuidad del material explosivo.

Por lo tanto, los equipos con tecnología compleja y/o explosivos deben tratarse como equipos delicados.

## **2.4. Rugosidad del camino**

Cada tipo de carretera tiene sus propias características. Las carreteras pavimentadas nos permiten conducir a altas velocidades con una oscilación casi imperceptible durante la conducción. Por otro lado, las condiciones todo terreno limitan la velocidad de conducción debido a las capacidades de suspensión y la excitación bajo la que se encuentra el conductor. El factor de seguridad siempre está presente y también limita al conductor a reducir la velocidad en malas condiciones del camino, donde es posible dañar el vehículo o herir a la tripulación.

Es posible emular las características del camino a través de varios procedimientos y clasificaciones, donde las propiedades estadísticas describen cómo se debe representar una superficie del camino, para así exigir al vehículo a través del contacto de las ruedas con el suelo.

## **2.5. Terreno aleatorio**

Se considera que en los caminos existe excitación aleatoria en 3 ejes, vertical, longitudinal, transversal. Para simplificar la representación de la superficie de la carretera, solo se deben considerar los cambios aleatorios en el eje vertical a lo largo del eje longitudinal (Tyan, 2010) (Reza-kashyzadeh y otros, 2014).

Una de las características que tienen las funciones aleatorias es que el valor instantáneo no puede predecirse de manera determinista (Wong, 2001). Sin embargo, ciertas propiedades de estas funciones se pueden describir estadísticamente. El valor de la media cuadrática de una función aleatoria puede determinarse promediando la señal completa o parte de ella, obteniendo medias locales. Además, a través de los métodos de transformación de Fourier, se puede establecer el contenido de frecuencia de la función.



La media cuadrática de las amplitudes está relacionada con la energía que tiene la señal. Al obtener la raíz cuadrada de esta última, se obtiene el valor de la media cuadrática (RMS, Root Mean Square), que es la representación normal del nivel de energía de la señal.

El nivel de amplitud de ciertas ondas se puede contrastar con la longitud de onda. Esto nos arroja un perfil en el dominio de frecuencia/longitud de onda. Entonces, la amplitud puede expresarse como una función continua de frecuencia o longitud de onda.

Al dividir las RMS por el ancho de banda, se obtiene la densidad espectral de potencia media  $S$ , con respecto a la frecuencia. Entonces, la función de densidad espectral de potencia discreta  $S(n\Omega_0)$  se convierte en una función de densidad espectral de potencia continua  $S(\Omega)$ , donde esta relación corresponde a los espectros de la señal aleatoria (Wong, 2001).

La frecuencia espacial  $\Omega$ , es la inversa de la longitud de onda  $l_w$  (es decir,  $\Omega = \frac{1}{l_w}$ ), y se expresa en ciclos por metro. En paralelo, la densidad espectral de potencia para la amplitud del perfil se expresa en  $m^2/ciclos/m$ .

La relación entre la densidad espectral de potencia y la frecuencia espacial para los perfiles de tierra puede ser aproximada por Wong (2001):

$$S_g(\Omega) = C_{sp} \Omega^{-N}$$

Donde  $S_g(\Omega)$  es la función de densidad espectral de potencia de la elevación del perfil de la superficie,  $C_{sp}$  es el llamado coeficiente de rugosidad y  $N$  es el índice del terreno relacionado con la ondulación del perfil. Ambos afectan el valor RMS de la señal, pero de manera diferente.

Para una mejor comprensión de estos dos parámetros, “*la variabilidad del camino vertical consiste en el paisaje que cambia lentamente (topografía), la irregularidad de la superficie del camino (aspereza del camino) y los componentes de alta variabilidad (textura del camino)*” (Rychlik, 2012). El primero no debe considerarse ya que no afecta la dinámica del vehículo. El coeficiente de rugosidad será parametrizado por el grado de desnivel y la textura por la ondulación, también llamado índice del terreno.

En 1973, Dodds y Robson comenzaron a proponer una descripción de la rugosidad de la superficie de la carretera utilizando procesos aleatorios gaussianos como los descritos anteriormente, analizados en términos de sus características de densidad espectral de potencia (PSD, Power Spectral Density). Otros han propuesto variedades



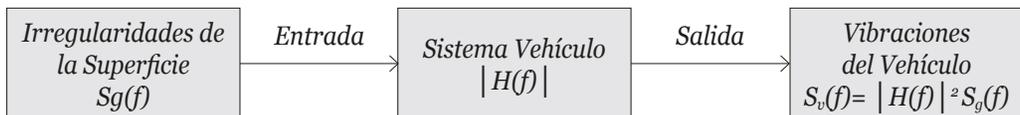
para este método, como incluir un filtro de conformación (Crolla, 2017) y aproximación sinusoidal o aceleración especial para una mejor identificación de eventos transitorios (Aramini, 2012).

### 3. MODELACIÓN Y SIMULACIÓN

#### 3.1. Función de respuesta de frecuencia (FRF, Frequency Response Function)

Cuando el vehículo viaja sobre una superficie ondulada, la exigencia generalmente consistirá en una amplia gama de frecuencias. Las entradas de alta frecuencia pueden aislarse efectivamente a través de la suspensión, dado a que la frecuencia natural de la masa suspendida es baja (Wong, 2001). Sin embargo, las excitaciones de baja frecuencia pueden transmitirse a la carrocería del vehículo sin impedimentos, o incluso amplificadas, ya que la relación de transmisibilidad es alta cuando la frecuencia de exigencia está cerca de la frecuencia natural de la masa suspendida.

La FRF es la relación (ratio) entre entrada y salida para un sistema lineal. En el vehículo, las características de la función de transferencia modificarán la entrada representada por las irregularidades de la superficie a la salida que representa la vibración en el vehículo (Crolla, 2017). En condiciones de estado estacionario, la relación de transmisibilidad  $H(f)$  puede expresarse mediante:



Donde la función de transferencia está dada por:

$$|H(f)| = \left| \frac{1 + \left(\frac{2\zeta f}{f_n}\right)^2}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{f}{f_n}\right)^2\right]^2 + \left[\frac{2\zeta f}{f_n}\right]^2}} \right|$$

Las variables que deben considerarse en la FRF del sistema de suspensión del vehículo son las características de los resortes de suspensión (principalmente a través de la rigidez), el rendimiento de amortiguación de los amortiguadores a través del coeficiente de amortiguación, la distancia de desplazamiento de la rueda, la rigidez del neumático, la masa suspendida y no suspendida y, finalmente, las condiciones de carga (Crolla, 2017).



La masa no suspendida no influye en la vibración de la masa suspendida en el rango de baja frecuencia. Por otro lado, los neumáticos y la rigidez del resorte afectan la respuesta de la masa suspendida. Cuanto mayor sea la relación  $k_{tr}/k_s$ , menor será la relación de transmisibilidad. Del mismo modo, cuanto mayor sea la relación de amortiguación, también disminuirá la relación de transmisibilidad en la frecuencia natural de masa suspendida.

### 3.2. Modelo de cuatro grados de libertad (DoF)

A través de un modelo 4 DoF, se puede describir la dinámica de suspensión del vehículo del LandRover L110.

El Diagrama de Cuerpo Libre que se muestra en la figura N° 1, representa el modelo del sistema de suspensión del L110, donde  $Z_{g1}$  (Delantero) y  $Z_{g12}$  (Trasero) son las entradas debido al contacto del suelo con los neumáticos. La rigidez de cada neumático se calcula de acuerdo con  $k_{tr} = 3,81p + 144,25$  [17], donde  $p$  es la presión del neumático. Las salidas del sistema son  $Z_{us1}$  y  $Z_{us2}$  relacionadas con las masas no suspendidas  $m_{us1}$  y  $m_{us2}$  para el eje delantero y trasero respectivamente, más  $Z_s$  que está asociado a la masa suspendida  $m_s$  del vehículo en el Centro de Masa (CoG). Cada amortiguador está representado por la rigidez  $k_s$  y el coeficiente de amortiguación  $C_s$ . La componente de inclinación se describe por  $\theta_s$ , con  $l_1$  y  $l_2$  como distancias al eje delantero y trasero, respectivamente.

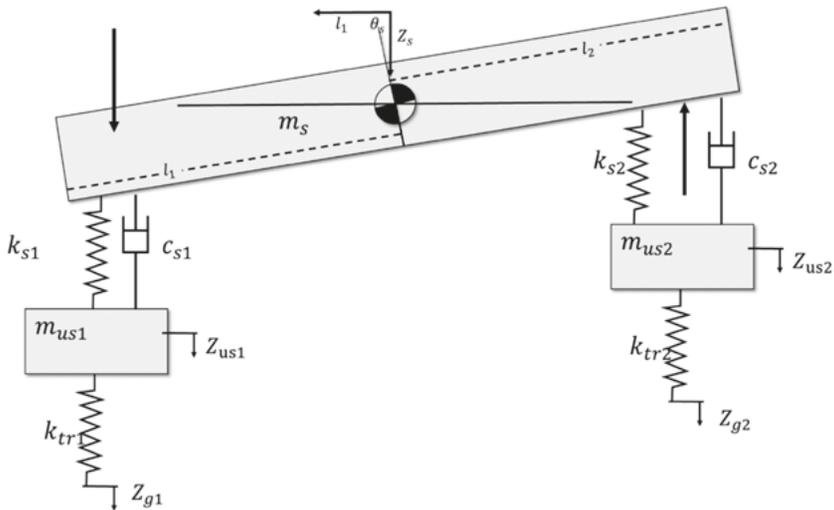


Figura N° 1: Modelo del sistema de suspensión del LR110, 4 grados de libertad (DoF).

Fuente: Elaboración propia.

De este diagrama se deducen las siguientes ecuaciones de movimiento:



$$m_s \ddot{Z}_s = -k_{s1}(Z_s - l_1 \theta_s - Z_{us1}) - c_{s1}(\dot{Z}_s - l_1 \dot{\theta}_s - \dot{Z}_{us1}) - k_{s2}(Z_s - l_2 \theta_s - Z_{us2}) - c_{s2}(\dot{Z}_s - l_2 \dot{\theta}_s - \dot{Z}_{us2})$$

$$I_s \ddot{\theta}_s = l_1 k_{s1}(Z_s - l_1 \theta_s - Z_{us1}) + l_1 c_{s1}(\dot{Z}_s - l_1 \dot{\theta}_s - \dot{Z}_{us1}) + l_2 k_{s2}(Z_s - l_2 \theta_s - Z_{us2}) + l_2 c_{s2}(\dot{Z}_s - l_2 \dot{\theta}_s - \dot{Z}_{us2})$$

$$m_{us1} \ddot{Z}_{us1} = -k_{tr1}(Z_{us1} - Z_{g1}) - k_{s1}(Z_{us1} + l_1 \theta_s - Z_s) - c_{s1}(\dot{Z}_{us1} + l_1 \dot{\theta}_s - \dot{Z}_s)$$

$$m_{us2} \ddot{Z}_{us2} = -k_{tr2}(Z_{us2} - Z_{g2}) - k_{s2}(Z_{us2} + l_2 \theta_s - Z_s) - c_{s2}(\dot{Z}_{us2} + l_2 \dot{\theta}_s - \dot{Z}_s)$$

Usando la teoría de espacios de estado y Matlab, el sistema anteriormente descrito se resuelve y se ajusta. La FRF se muestra en la figura N° 2, donde se observan las frecuencias de los dos modos ( 2, 4 Hz para el modo de resonancia del chasis y 11 Hz para el modo de resonancia de la rueda).

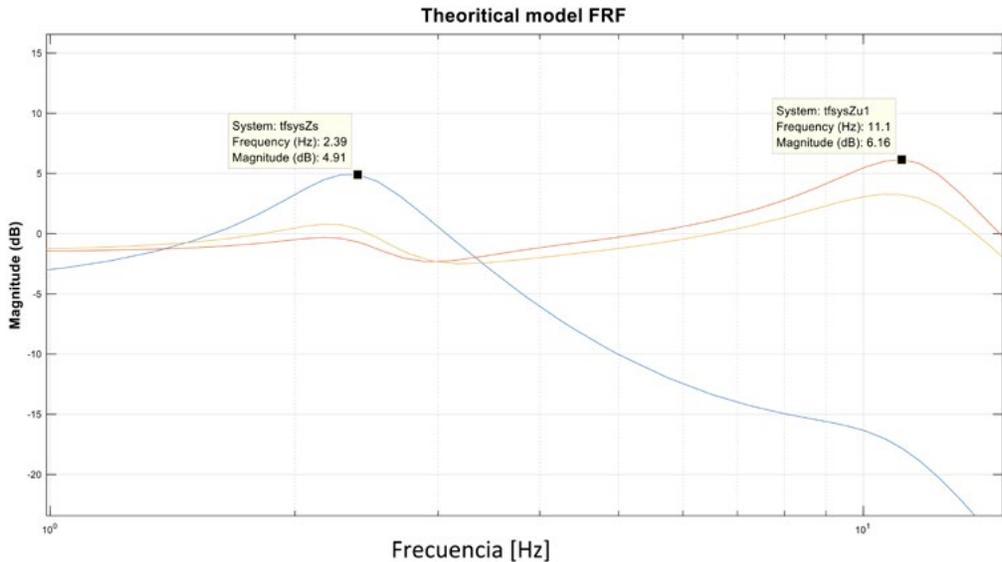


Figura N° 2: FRF del modelo matemático.

Fuente: Elaboración propia.

A través de este modelo es posible variar las características de suspensión del vehículo, haciendo posible el análisis de otros escenarios.

### 3.3. Respuesta experimental

Una vez establecida la disposición de las cajas, los sensores y los perfiles del terreno, la transmisibilidad desde la entrada del suelo  $Z_g$  a los diferentes componentes y otras relaciones se midieron bajo barridos y perfiles aleatorios. Las relaciones de relación se realizaron de acuerdo con la tabla N° 2.



INPUT	OUTPUT	NOTATION
$Z_g$	$Z_{IsF}, Z_{IsR}$	$Z_g$ = entrada del suelo $Z_{Is}$ = superficie de carguío $Z_{BoxEx}$ = caja excalibur $Z_{Box70mm}$ = caja 70 mm $Z_{Exc}$ = excalibur $Z_{70mm}$ = 70 mm
$Z_g$	$Z_{IsF}, Z_{IsR}$	
$Z_g$	$Z_{BoxExF}, Z_{BoxExR}$	
$Z_g$	$Z_{Box70mmF}, Z_{Box70mmR}$	
$Z_g$	$Z_{ExcF}, Z_{ExcR}$	
$Z_g$	$Z_{70mmF}, Z_{70mmR}$	
$Z_{IsR}$	$Z_{BoxExF}, Z_{BoxExR}$	
$Z_{IsR}$	$Z_{ExcF}, Z_{ExcR}$	
$Z_{IsR}$	$Z_{Box70mmF}, Z_{Box70mmR}$	
$Z_{IsR}$	$Z_{70mmF}, Z_{70mmR}$	
$Z_{BoxExR}$	$Z_{ExcF}, Z_{ExcR}$	
$Z_{Box70mmR}$	$Z_{70mmF}, Z_{70mmR}$	

Tabla Nº 2: Relaciones de transmisibilidad.

Fuente: Elaboración propia.

Como ejemplo, en la figura Nº 3 se presenta la transmisibilidad de la superficie de carga delantera / trasera bajo un perfil de terreno aleatorio a 3 velocidades diferentes del vehículo.

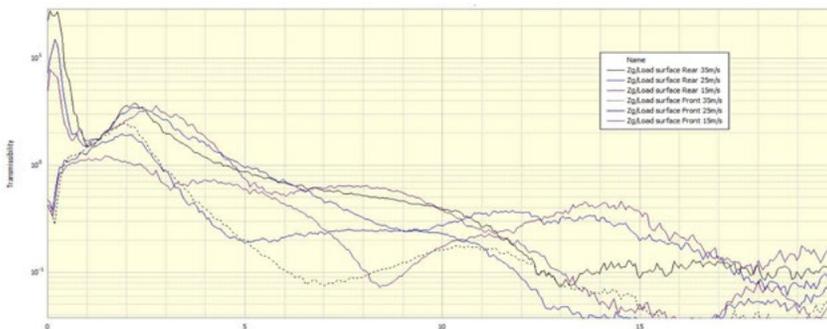


Figura Nº 3: Transmisibilidad de la superficie de carga.

Fuente: Elaboración propia.

Cabe señalar que las mediciones delantera y trasera siguen tendencias claramente diferentes a lo largo de las velocidades. En el rango de **2 - 5 Hz**, se evidencia el modo de resonancia del chasis. Las frecuencias superiores a **10 Hz** no representan transferencia de energía a la superficie de carga.

En el ejemplo de la figura Nº 4, se muestra la transmisibilidad de la configuración de la munición Excalibur bajo un perfil de terreno aleatorio. El modo de resonancia del chasis



está presente en cada función de transferencia (TF, Transfer Function) que incluye la alteración del suelo. Además, la transferencia entre la caja y el dispositivo es casi nula, lo que significa que la caja se comporta como una extensión del dispositivo, ambos tienen las mismas aceleraciones.

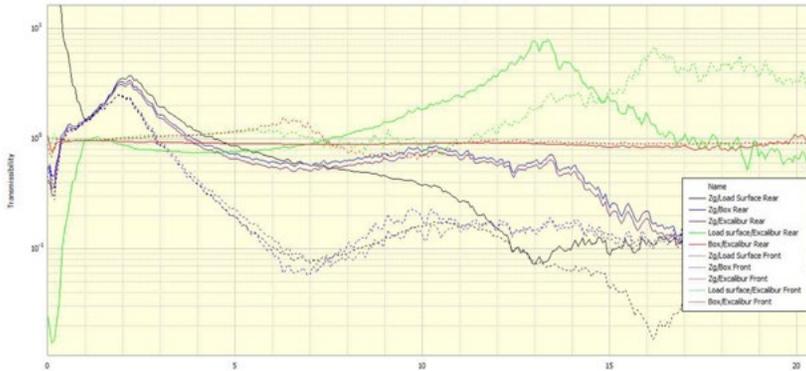


Figura N° 4: Transmisibilidad de la munición Excalibur.

Fuente: Elaboración propia.

## 4. EXPERIMENTACIÓN Y RESULTADOS

De acuerdo con los objetivos planteados, se configuraron pruebas para la determinación de los efectos vibracionales de la velocidad del vehículo y la rugosidad del perfil del terreno en la carga.

### 4.1. Configuración de prueba

Se establecieron las condiciones básicas, es decir, dos cajas con dos tipos de municiones (Excalibur y 70 mm), orientadas longitudinalmente sin ningún material o dispositivo entre la superficie de carga y las cajas. Además, no se considera el almacenamiento y las condiciones de carga correspondientes a la configuración de control.

El ajuste de los amortiguadores en el vehículo se establece con los mismos parámetros que los amortiguadores convencionales normales.

La ubicación de los sensores es la que se describe en la figura N° 5. Esta configuración recopiló datos de los 3 ejes en la ubicación delantera y trasera de la superficie de carga, cajas y dispositivos. Sin embargo, solo se analizaron los datos más destacados y relevantes. Como ejemplo, las mediciones desde las ubicaciones traseras tenían amplitudes más altas y más claras, luego, para algunos análisis, la señal trasera se consideró como referencia.

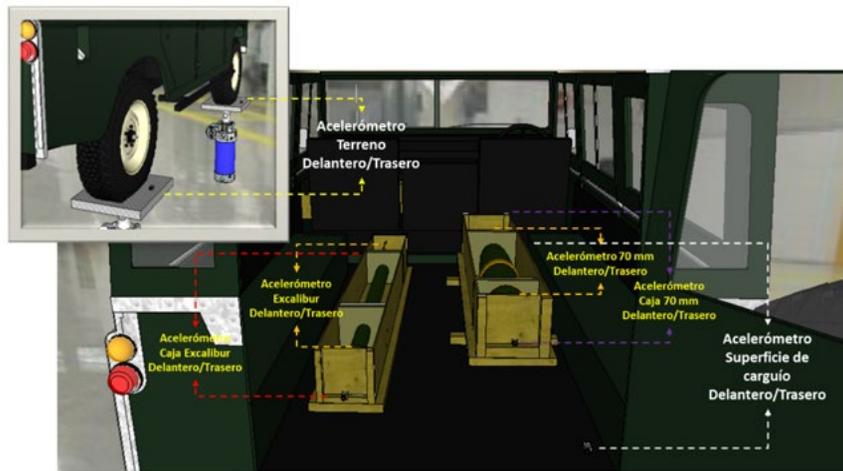


Figura N° 5: Distribución de sensores.

Fuente: Elaboración propia.

## 4.2. Variación de velocidades

La prueba consiste en medir la vibración  $\frac{m}{s^2}$  en los dispositivos a diferentes velocidades emuladas en la plataforma de actuadores sobre el mismo perfil de terreno.

El incremento de velocidad consiste en  $5 \text{ m/s}$  para cada exposición, comenzando desde  $5 \text{ m/s}$  ( $18 \text{ km/h}$ ) hasta  $35 \text{ m/s}$  ( $126 \text{ km/h}$ ).

La exposición de tiempo total para cada velocidad es de  $300 \text{ s}$ , suficiente para lograr una buena resolución de ASD.

## 4.3. Análisis de resultados

El espectro de PSD representa la energía para cada rango de frecuencia local. Para una mejor comprensión y para simplificar los análisis, se deben definir tres rangos de frecuencias por las siguientes razones:

- Rango de baja frecuencia LFR ( $1\text{-}5 \text{ Hz}$ ). Los estándares no consideran este rango, aunque el modo de resonancia del chasis está presente en él.
- Rango de frecuencia media MFR ( $5\text{-}11 \text{ Hz}$ ). Los estándares todoterreno estipulan las amplitudes más altas en este rango, centradas en  $7 \text{ Hz}$ .
- Rango de alta frecuencia HFR ( $11\text{-}20 \text{ Hz}$ ). Existe una disminución en los niveles de amplitud definidos por los estándares más allá de  $11 \text{ Hz}$ . Se supone que las frecuencias más altas se deben filtrar efectivamente mediante el aislamiento del empaque.



#### 4.4. Características de los espectros experimentales

Como se muestra en la figura N° 6 y la figura N° 7, existe un incremento general en el PSD a lo largo del rango de frecuencia cuando se aumenta la velocidad del vehículo. Al centrarse en el LFR, los peaks corresponden al modo de resonancia del chasis, pero a medida que disminuye la velocidad, los peaks de resonancia se desplazan a frecuencias más altas de hasta  $3,5 \text{ Hz}$ .

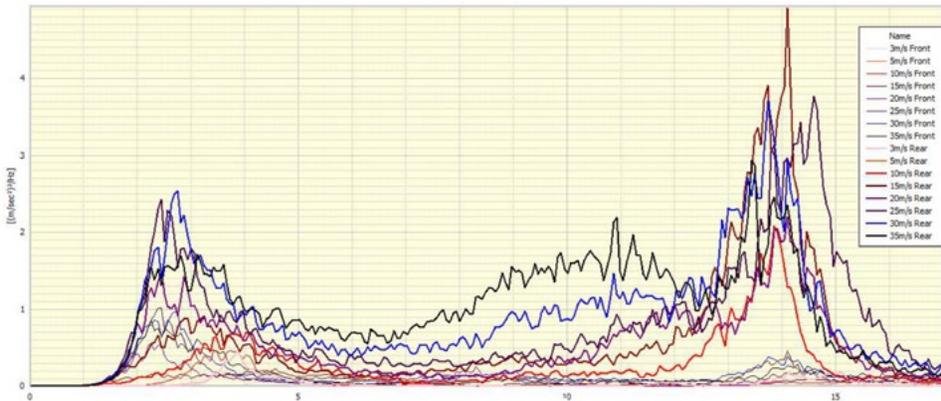


Figura N° 6: Densidad espectral a distintas velocidades, Excalibur.

Fuente: Elaboración propia.

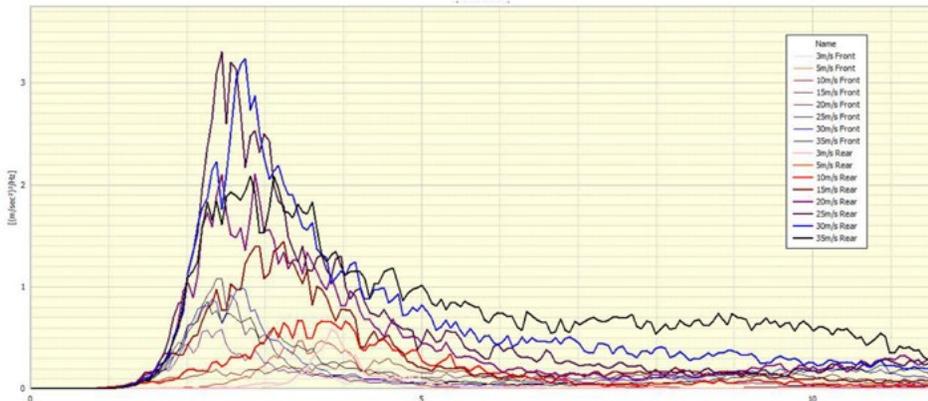


Figura N° 7: Densidad espectral a distintas velocidades, 70 mm.

Fuente: Elaboración propia.

En todas las pruebas, las mediciones posteriores experimentan una amplitud significativamente mayor que las mediciones frontales. Esto se debe a una mayor distancia desde la ubicación del punto de cabeceo del vehículo, lo que significa desplazamientos más grandes en el eje vertical.

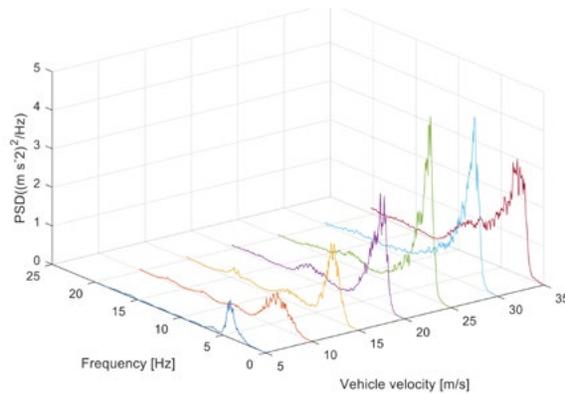


Figura N° 8: Variación de la vibración de acuerdo a la velocidad del vehículo.

Fuente: Elaboración propia.

La figura N° 9 muestra los valores máximos de PSD y los valores promedio para los tres rangos de frecuencia. En ambos dispositivos, el LFR alcanza un pico y luego tiende a disminuir con las velocidades más altas del vehículo. El rango de alta frecuencia para el Excalibur sigue un comportamiento irregular, donde los 70 mm permanecen en amplitudes bajas con una tendencia similar.

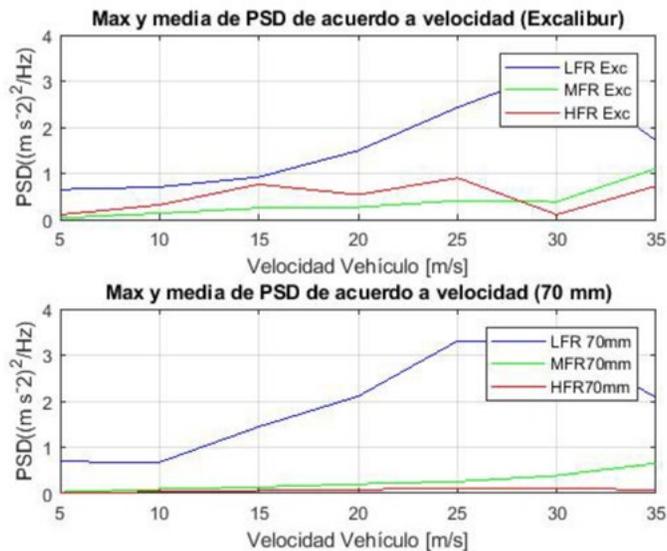


Figura N° 9: Análisis de velocidad del vehículo a través de máximos y medias.

Fuente: Elaboración propia.

El MFR, donde los estándares enfocaron los niveles de amplitudes más altos, evidencia una clara tendencia creciente de acuerdo con las velocidades del vehículo.



### 4.5. Contraste contra el estándar

En la figura N° 10 se contrastan los cambios en las velocidades para el 70 mm. Como se expuso anteriormente, el LFR no se puede comparar debido a la inexistencia de perfil en los estándares, por lo que ya no se realizará la comparación. Como se muestra en la figura N° 9, la PSD más alta se alcanza a **30 m/s**, que no es la velocidad máxima probada, como normalmente se podría inferir.

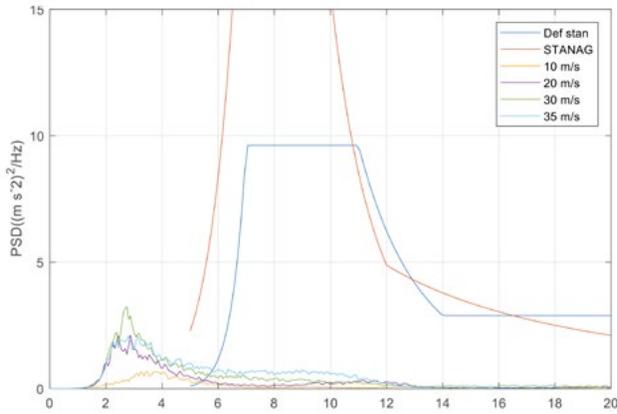


Figura N° 10: Comparación de resultados en contraste de estándares de vibración vertical.

Fuente: Elaboración propia.

Los valores de PSD en MFR y HFR se promediaron para obtener una relación entre el valor máximo de exposición a la vibración con respecto a los estándares.

Rango	Escalibur				70 mm				Superficie de carguío						
	Método	Valor Max PSD $(\frac{m^2}{s^4})/Hz$	Veloc. relativa vehicul $[g]$	% del valor		Método	Valor Max PSD $(\frac{m^2}{s^4})/Hz$	Veloc. relativa vehicul $[g]$	% del valor		Método	Valor Max PSD $(\frac{m^2}{s^4})/Hz$	Veloc. relativa vehicul $[g]$	% del valor	
				STANAG	DEF STAN				STANAG	DEF STAN				STANAG	DEF STAN
LFR	Max Peak en rango	2,54	30	Low Freq DS 42%		Max Peak en rango	3,31	25	Low Freq DS 55%		Max Peak en rango	4,73	25	Low Freq DS 79%	
MFR	Promedio Freq rango	1,11	35	2%	11%	Promedio Freq rango	0,65	35	1%	7%	Promedio Freq rango	0,86	35	1%	9%
HFR	Max Peak en rango	4,92	15	131%	171%	Max Peak en rango	0,12	25	5%	4%	Max Peak en rango	0,14	25	6%	5%

Tabla N° 3: Análisis de resultados de FRF en contraste de estándares.

Fuente: Elaboración propia.

### 4.6. Estimación de la exposición a la vibración necesaria para superar el estándar

Al ajustar funciones polinómicas de diferentes órdenes a los datos, es posible proyectar el comportamiento de la exposición a la vibración para velocidades hipotéticas más



altas (figura N° 11). La intención de lo anterior es estimar a qué velocidades el vehículo debe conducir para llegar al final de los niveles del estándar.

La única respuesta que continúa aumentando se logra en el MFR para ambos dispositivos. Para la Excalibur, la velocidad límite sobre el perfil del terreno sería  $67 \text{ m/s}$  para los niveles del Def Stan y  $94 \text{ m/s}$  para el STANAG. Se obtienen velocidades más bajas para el 70 mm,  $60 \text{ m/s}$  y  $89 \text{ m/s}$ , respectivamente.

En teoría, los niveles de exposición a la vibración en el LFR y el HFR disminuirán con la intensificación de la velocidad del vehículo debido a las características del sistema de suspensión.

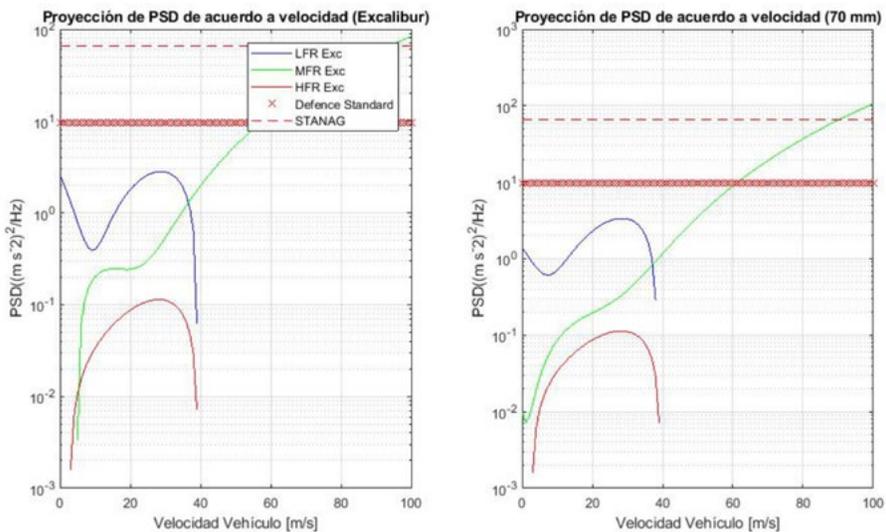


Figura N° 11: Proyección de exposición a la vibración como función de velocidad del vehículo.

Fuente: Elaboración propia.

## 5. DISCUSIÓN

En relación con el aumento de la velocidad del vehículo, se evidencia que existen diferentes comportamientos para los tres rangos de frecuencia. A medida que aumenta la velocidad, la PSD también aumenta.

El primer rango a comentar es el LFR, donde la tendencia parece ser que hay una reducción de la vibración en bajas frecuencias a una velocidad superior a  $30 \text{ m/s}$ . Es bien sabido que a veces es preferible conducir más rápido que más lento por caminos irregulares. El vehículo permanece estable y las ruedas no tienen tiempo suficiente para caer en los accidentes del camino. Sin embargo, si los golpes hacen que la rueda



suba, la energía transmitida al eje será mayor. En la mayoría de los casos, el sistema de suspensión absorbe eficientemente esa energía.

Considerando lo último, el comportamiento obtenido en la plataforma de actuadores representa lo que sucede en la realidad. La rotación de las ruedas y el desprendimiento pueden reducir la velocidad donde la vibración comenzará a reducirse. El aumento de la velocidad aumentará la vibración en la carga hasta cierta velocidad, después de eso se reducirán las amplitudes de baja frecuencia.

Se podrían realizar más investigaciones para determinar más información sobre este comportamiento y hasta qué nivel se puede reducir. Un enfoque podría estar relacionado con la coincidencia del tiempo de muestra entre la rueda delantera y trasera con la frecuencia del modo de resonancia del chasis. Los armónicos de este modo pueden estar representados en las velocidades de mayor velocidad, pero no coincidir con una mayor velocidad que (en este caso)  $25 \text{ m/s}$ .

Con velocidades más altas, en algún momento el vehículo comenzará a separarse, con contactos cortos al suelo. Las capacidades de los transportes militares reales no conducen a más de  $85 \text{ km/h}$ , no por una restricción de potencia, sino por razones de seguridad.

Cuando contrastamos los datos experimentales obtenidos con el estándar de empaquetamiento para las bajas frecuencias (Defence Standard), 2003), los niveles de vibración están claramente más cerca del nivel estándar.

Con condiciones más duras combinadas con altas velocidades, la PSD a bajas frecuencias puede superar fácilmente los niveles de prueba. Eso no implica necesariamente fallas en el dispositivo, pero al menos se exceden los niveles de los estándares de empaque. Como se mencionó anteriormente, este estándar no está relacionado con la exposición del dispositivo, sino con la relación del embalaje y el contenido.

El segundo rango a analizar es el MFR. Aquí los estándares ponen un énfasis excesivo en las altas amplitudes para las pruebas. La razón de esto podría estar relacionada con el daño que pueden hacer esas frecuencias. Es determinar específicamente la razón de los diferentes niveles para los estándares. Es comprensible que cuanto menor sea la frecuencia, mayor será la amplitud. Pero se debe indagar en el motivo de las diferencias en las amplitudes para distintas frecuencias.

En este rango, la exposición medida es claramente menor que el LFR. No hay modo de resonancia evidente. En términos generales, hay una tendencia constante y



decreciente en las diferentes velocidades. Sin embargo, la tendencia promedio tiene una pendiente positiva, lo que permite proyectar la exposición a la vibración de acuerdo con las velocidades más altas del vehículo. Como se muestra en la figura N° 11, cada munición probada tendrá una velocidad en la que se alcance el nivel estándar. En particular, conducir un Land Rover a  $60 \text{ m/s}$  ( $216 \text{ km/h}$ ) por un camino irregular no es realista.

El tercer rango HFR sigue la misma tendencia que el LFR. A medida que la velocidad del vehículo supera una cierta velocidad, la vibración se detiene para aumentar y comienza a disminuir.

Las frecuencias insertadas no estaban destinadas a alcanzar respuestas a frecuencias altas, por lo que este rango de frecuencias puede catalogarse como un efecto secundario. Las bombas hidráulicas del sistema y los actuadores en sí producen ruido y vibraciones de alta frecuencia, pero esto no es real en la conducción normal. Por lo tanto, este rango no se debe tomar en consideración. Además, se demuestra que, con un embalaje adecuado, la vibración se reduce extremadamente.

Al combinar el comportamiento debido al aumento de la velocidad del vehículo con el aumento de la rugosidad, se logra el peor escenario teórico. El nivel de PSD podría alcanzar los  $6.4 \frac{(m/s^2)^2}{Hz}$ . Debe considerarse que este escenario es una proyección de los datos obtenidos.

Considerando un factor de seguridad del 50%, el nivel para el MFR está cerca del Def Stan. Para alcanzar al STANAG, el factor de seguridad (o factor de amplificación) debe ser 1000%. Eso demuestra que este estándar claramente supera la prueba del material. Observando los datos de las publicaciones, el Def Stan tiene una fecha de publicación más reciente que el STANAG. Eso podría implicar que se ha hecho una reducción de los estándares previamente. Se deben realizar más indagaciones para aclarar este punto. Sin embargo, STANAG todavía está regulando la fabricación de los dispositivos militares y sus empaquetamientos, lo que significa que aún está vigente.

El embalaje de equipos delicados como los misiles implica altos niveles de aislamiento y tecnología. Puede ser razonable suponer que el embalaje de misiles superará los estándares establecidos para la prueba de embalaje normal.

Se demuestra que los niveles para el transporte de los estándares están lejos de la exposición a la vibración medida en los experimentos. Centrándose en el MFR, el alcance de la vibración en el peor de los casos es un 11% del Def Stan. Esto último prueba que los estándares son extremadamente altos para el MFR.



Por último, no hay evidencia que muestre que las municiones fueran sometidas a modos de flexión. Eso puede deberse a la ubicación de los acelerómetros, que no estaban destinados a analizar ese problema en particular. Sin embargo, la exposición se puede aplicar a otras formas de equipo militar, no son necesarios cilindros alargados como misiles o municiones de alto calibre. Futuras investigaciones deben centrarse en las condiciones de flexión, restringiéndose a un solo dispositivo específico.

## 6. CONCLUSIONES

La plataforma de actuadores reproduce el perfil del terreno con un cierto factor de amplificación que produce una exigencia más dura de lo que la teoría declara. Esto podría atribuirse a la lectura de los datos y su reproducción a través de las plataformas de contacto. Se debe analizar este tema en un trabajo posterior. Sin perjuicio de lo último, la emulación de un terreno accidentado se logró mediante la aplicación de un factor de reducción.

El LFR es donde las amplitudes más altas eran evidentes, no solo en la carga, sino también en la superficie de carga. Esas frecuencias son demasiado difíciles de aislar porque implican grandes amplitudes de desplazamiento del sistema de aislamiento. Debido al hecho de que no se consideran en los estándares, solo se realizó una comparación con un estándar de empaque, donde la PDS logró alcanzar los niveles.

Los incrementos de la velocidad del vehículo y la rugosidad de la carretera aumentan la exposición a la vibración en la superficie de carga, y, por lo tanto, en la carga. En el LFR y el HFR, la tendencia es disminuir después de una cierta velocidad ( $30 \text{ m/s}$ ), cuando para el MFR los niveles de vibración seguirán aumentando con la velocidad teórica. Para los incrementos de rugosidad de la carretera, la vibración aumenta en los tres rangos.

La prueba de los estándares de fabricación para la exposición a la vibración debido al transporte conduce a condiciones de sobreexcitación. Los resultados muestran que los niveles de exposición a la vibración logrados en la carga sobre carreteras en mal estado son muy inferiores en comparación con los estándares de fabricación en el MFR y el HFR. En teoría, podemos conducir tan rápido como el vehículo puede sobre terreno extremadamente accidentado. Pero eso no es posible debido a restricciones de tránsito, las características del sistema de suspensión del vehículo y la seguridad de la tripulación, entre otros factores. Además, exponiendo el equipo a vibraciones superiores niveles de las pruebas no significan que el dispositivo fallará. El equipo está destinado a superar la prueba y siguen trabajando para alcanzar los requisitos de la norma.



En consecuencia, los dos estándares trabajados se pueden reducir en el MFR, donde un PSD de  $6.4 \frac{(m/s^2)^2}{Hz}$  resultó como la peor condición posible para reproducirse en la superficie de carga del LR. Con un factor de seguridad del 50%, se alcanzan los niveles Def Stan. Eso nos permite concluir que este estándar está en los niveles correctos. Sin embargo, el estándar STANAG todavía está en uso, que tiene una tasa de sobre prueba de 1000% en el MFR.

Al cambiar las condiciones de carga del vehículo, es posible disminuir las amplitudes en todo el rango de frecuencia, especialmente en el LFR, lo que lo hace menos sensible a las oscilaciones de bajas frecuencias. Este enfoque se presenta como la única forma efectiva de disminuir la exposición a la vibración.

## BIBLIOGRAFÍA

- ARAMINI, B. (2012). Validation of Land Rover suspension model. Cranfield University.
- BRITISH, C.; STANDARDS, D. (2018). Defence Standard 00- 035 Part 3 Environmental Handbook for Defence Materiel Environmental Test Methods.
- BRITISH STANDARD (2013). Packaging Code Introduction to packaging.
- CROLLA, D. (2017). Fundamentals of vehicle dynamics and control.
- DABORN, PM.; IND, PR.; EWINS, DJ. (2014). Enhanced ground-based vibration testing for aerodynamic environments. Mechanical Systems and Signal Processing. Elsevier; 49(1-2): 165-180. Disponible en: DOI:10.1016/j.ymssp.2014.04.010
- DODDS, CJ.; ROBSON, JD. (1973). The Description of Road Surface Roughness. *Journal of Sound and Vibration*. Academic Press Inc. (London) Limited; 31(2): 175-183. Disponible en: DOI:10.1016/S0022-460X(73)80373-6
- INTERNATIONAL STANDARIZATION ORGANIZATION (2016). ISO 8606 Road surface profiles - Reporting of measured data.
- ISO, BSEN (2003). En BS. Packaging-Complete, filled transport packages and unit loads - Vibration tests at fixed low frequency.
- LLOYD, R. (1998). Conventional Warhead Systems Physics and Engineering Design. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc.



MINISTRY OF DEFENCE (2018). Defence Standard 81-41 Part 5 Packaging of Defence Materiel Production Processes. North Atlantic Treaty Organization. Fuzing Systems - Safety Design Requirements STANAG 4187.

NORTH ATLANTIC TREATY ORGANIZATION (2006). Mechanical Environmental Tests AECTP 400.

REZA-KASHYZADEH, K.; OSTAD-AHMAD-GHORABI, MJ.; ARGHAVAN, A. (2014). Investigating the effect of road roughness on automotive component. Engineering Failure Analysis. Elsevier Ltd; 41: 96–107. Disponible en: DOI:10.1016/j.engfailanal.2013.12.008.

ROUILLARD, V.; BRUSCELLA, B.; SEK, M. (2000). Classification of Road Surface Profiles. Journal; 3(February): 41–45.

RYCHLIK, I. (2012). Modelling of road profiles using roughness indicators.

WONG, JY. (2001). Theory of ground Vehicles. Journal of Chemical Information and Modeling. 1689–1699 p. Disponible en: DOI:10.1017/CBO9781107415324.004