



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE CIUDAD JUÁREZ

La Universidad Autónoma de Ciudad Juárez
a través del Instituto de Ingeniería y Tecnología
y del Departamento de Ingeniería Industrial y Manufactura
otorga el presente

RECONOCIMIENTO

a: Manuel Román Piña Monárrez

por su participación como ponente, presentando el trabajo:

“Desarrollo de Plan de Prueba para Elementos Mecánicos Sujetos a Vibración Aleatoria Considerando el Efecto de la Temperatura y Resonancia”

en el marco del

1ER CONGRESO INTERNACIONAL DE LAS
FRONTERAS
DE LAS INGENIERÍAS 2025
INVESTIGACIÓN PARA UN MUNDO CONECTADO

llevado a cabo del 26 al 28 de noviembre de 2025
en Ciudad Juárez, Chihuahua, México.

Dr. Erwin Adan Martínez Gómez
Director del
Instituto de Ingeniería y Tecnología

Dr. Roberto Romero López
Jefe del Departamento de
Ingeniería Industrial y Manufactura

UACJ INSPIRA EL FUTURO

IIT



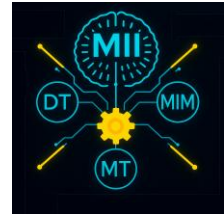
IPC INSTITUTO DE INNOVACIÓN Y COMPETITIVIDAD

FESTO



UAN ANTONIO NARIÑO





Desarrollo de Plan de Prueba para Elementos Mecánicos Sujetos a Vibración Aleatoria Considerando el Efecto de la Temperatura y Resonancia

Ing. Alondra Paola Solis Ortiz¹, Dr. Manuel Román Piña Monárrez²

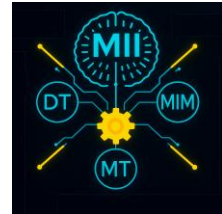
Resumen—Este avance aborda el desarrollo de un plan de prueba para elementos mecánicos sujetos a vibración aleatoria y temperatura con el objetivo de analizar el efecto y respuesta ante estas condiciones de prueba. El trabajo surge ante la necesidad de obtener un 97 por ciento de confiabilidad del elemento mecánico en entornos de vibración aleatoria y temperatura, los cuales presentan comportamientos complejos. En esta etapa se desarrolla una revisión exhaustiva de la literatura y se plantea el marco teórico que sustentará la formulación de la metodología. Asimismo, se definen los parámetros y las variables fundamentales para la simulación y el análisis posterior. Se espera que los resultados permitan establecer criterios para el diseño de sistemas más eficientes y estables, contribuyendo al desarrollo de estrategias de control aplicables a diferentes campos de la ingeniería mecánica.

Palabras clave— Vibración aleatoria, Prueba de Vida acelerada, Fatiga, Arrhenius, Confiabilidad, Weibull.

Introducción

La presente investigación aborda el desarrollo de un plan de prueba enfocado a elementos mecánicos sometidos a vibración aleatoria considerando los efectos combinados de la temperatura y la resonancia. Antes de profundizar en el proceso de prueba, es necesario definir qué se entiende por elemento mecánico. Este se concibe como una unidad básica dentro de una máquina, capaz de desempeñar una función específica de manera individual o como parte de un conjunto más complejo (Vanegas Useche, 2018). Su diseño debe garantizar que, al interactuar con otros elementos mecánicos, contribuyan al correcto funcionamiento del mecanismo (Mott, 2006). Los elementos mecánicos pueden ser parte de máquinas terrestres, marítimas, aéreas y espaciales por lo que es importante evaluar las condiciones ambientales de operación de cada una de las máquinas y a su vez la naturaleza de los esfuerzos a los que está expuesto el elemento mecánico. Éstos pueden experimentar fallas que comprometan su desempeño y le impidan cumplir su función original (Budynas & Nisbett, 2018). Dentro de las condiciones ambientales más críticas se encuentran la vibración aleatoria y el estrés térmico. La vibración aleatoria se considera una de las principales causas de falla en elementos mecánicos ya que induce la fatiga estructural provocada por la propagación gradual de grietas en zonas de alta concentración de esfuerzos (Newland, 1996). El efecto de la temperatura en la formación y propagación de grietas es un fenómeno complejo que actúa a distintos niveles. Un aumento de temperatura suele incrementar la oxidación del material, lo que hace que el proceso de agrietamiento dependa de la frecuencia de carga aplicada durante las pruebas. En general, se ha observado que un aumento en la temperatura conduce a una mayor velocidad de propagación de las grietas (Bathias & Pineau, 2010).

Para realizar el análisis del elemento mecánico sometido a vibración aleatoria se utiliza la norma ISO 16750-3, Ensayo IV (Test IV) (International Organization for Standardization, 2007), y para el análisis térmico se utiliza una prueba de vida acelerada de acuerdo con el estándar GMW3172 (General Motors, 2008). Sin embargo, aunque existen metodologías para evaluar individualmente cada fenómeno, la integración simultánea de ambos continúa siendo un desafío técnico, debido a que la vibración se describe en el dominio de la frecuencia mediante PSD, amplitudes y resonancia, mientras que la temperatura se modela mediante relaciones de activación térmica y curvas vida–esfuerzo. Esta diferencia en unidades y dominios analíticos dificulta correlacionar su daño combinado. Además, la evidencia en campo demuestra que la interacción vibración–temperatura representa un riesgo real. Diversos reportes de la *National Highway Traffic Safety Administration* (NHTSA) documentan fallas asociadas a cargas combinadas, como grietas por vibración aleatoria en brazos de control inferiores (Chevrolet Trax 2015–2019, NHTSA 19V312000), rotura por fatiga acumulada en suspensiones sometidas a esfuerzos cíclicos elevados (GILLIG, NHTSA 23E017000), degradación de arneses eléctricos expuestos simultáneamente a flexión, vibración y ambientes salinos (Honda Ridgeline, NHTSA 24V321000), y fracturas de resortes de válvula asociadas a mecanismos termo-dependientes (Hyundai Palisade, NHTSA 24V106000). Estas fallas generan pérdida de control en el vehículo, pérdida de potencia en el motor, riesgo



de incendio, lo que ha derivado en campañas de retiro que afectan desde cientos hasta cientos de miles de unidades. Esta evidencia confirma que la interacción entre vibración aleatoria y temperatura representa un problema real en la industria automotriz y que las condiciones combinadas requieren planes de prueba de validación más completas y representativas de la operación real.

En síntesis, el problema central que aborda esta investigación es la ausencia de un plan de prueba estandarizado que permita evaluar de manera integrada el daño inducido simultáneamente por vibración aleatoria, resonancia y temperatura, lo que genera incertidumbre en la estimación de la vida útil y dificulta la definición de planes de validación representativos de las condiciones reales de operación.

Metodología

Enfoque metodológico

La presente investigación se desarrolla bajo un enfoque cuantitativo y un procedimiento analítico-experimental, utilizando normas internacionales y modelos de predicción de vida para reproducir condiciones reales de estrés presentes en aplicaciones automotrices. Se emplean los perfiles de vibración aleatoria definidos en ISO 16750-3 y los modelos de vida acelerada térmica establecidos en GMW3172, con el fin de evaluar la confiabilidad del elemento mecánico cuando ambos fenómenos actúan de manera combinada.

Selección de Elemento Mecánico bajo Estudio

Para el desarrollo del plan de prueba se deben seleccionar las características del elemento mecánico que se quiere someter a prueba, refiérase a la Tabla 1.- Elemento Mecánico bajo Prueba.

Tabla 1.- Elemento Mecánico bajo Prueba

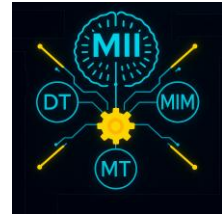
Sector Industrial	Automotriz, Naval, Aeroespacial, Ferroviario
Máquina (Nombre y Modelo)	Automóvil
Elemento Mecánico de la Máquina	Soporte de Arnés de Sensor de Oxígeno
Ubicación del Elemento Mecánico	Chasis, Cabina, etc.
Material del Elemento Mecánico	Formato técnico de Especificaciones del Material
Dimensiones	A x B x C
Geometría	Dibujo CAD
Estado actual de la pieza	Nuevo, usado, dañado
Norma u Estándar	De acuerdo con el sector industrial, seleccionar normas y estándares

Selección de Perfil de Vibración Aleatoria

El procedimiento contempla la selección del perfil de vibración en función de la ubicación del elemento dentro del sistema mecánico. La norma ISO 16750-3 establece distintos casos de prueba que cubren condiciones en motor, transmisión, carrocería, masas suspendidas y no suspendidas refiérase a la Tabla 2. De forma general, el investigador debe elegir el perfil más adecuado considerando la aplicación real, sin que este artículo limite la selección a un caso específico.

Tabla 2.- Tipos de Prueba dados por la norma ISO 16750-3

Prueba	Localización
Prueba 1 (<i>Test I</i>)	Motor
Prueba 2 (<i>Test II</i>)	Caja de Engranajes



Prueba 3 (<i>Test III</i>)	Cámara plenum flexible del sistema de admisión.
Prueba 4 (<i>Test IV</i>)	Masas suspendidas (carrocería del vehículo)
Prueba 5 (<i>Test V</i>)	Masas no suspendidas (rueda, suspensión de la rueda)
Prueba 6 (<i>Test VI</i>)	Vehículo comercial, motor, caja de engranajes.

Obtener Perfil de Vibración Aleatoria de Respuesta - Output PSD

Una vez que se seleccione el perfil adecuado de la norma ISO 16750-3, se obtiene el perfil de vibración aleatoria de respuesta (*Output PSD*) ya sea mediante simulación o mediante ensayo experimental, dependiendo de la disponibilidad de herramientas y del alcance del estudio refiérase a la Tabla 3.

Tabla. 3 Métodos de obtención de PSD de Salida

Tipo de Prueba	Método
Simulado	MATLAB
Experimental	Mesa vibratoria (<i>Shaker</i>) para pruebas de vibración

Análisis Estático a través de Ansys Workbench

Para realizar el análisis de vibración es necesario resolver tres módulos en *Ansys Workbench*, el módulo del análisis estático, modal y de vibración aleatoria. El análisis estático a grandes rasgos se realiza de la siguiente manera: Selección de material, cargar geometría, mallado, soportes – fixturas, fuerza.

Análisis Modal a Través de Ansys Workbench

Agregar el módulo de *Modal* y obtener las frecuencias naturales del elemento mecánico.

Análisis de Vibración Aleatoria a Través de Ansys Workbench

Agregar módulo de *Random Vibration* e introducir el *PSD* de salida que se obtuvo de *MATLAB*. Agregar tres resultados para obtener el *PSD* de respuesta el cual ya contempla el tiempo de operación de acuerdo con la norma, y la geometría. Cada uno de los resultados será en amplitud de aceleración y para cada eje coordenado.

Análisis de Fatiga Térmica a Través de Ansys Workbench

El efecto de la temperatura se modela con base en el estándar GMW3172, empleando un perfil térmico cíclico que representa condiciones aceleradas de envejecimiento.

Prueba de Vida Acelerada – Arrhenius – Minitab

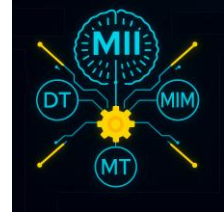
Para representar el efecto de la temperatura en la reducción de la vida útil, se incorpora el modelo de Arrhenius como referencia general. Este modelo permite estimar factores de aceleración y predecir cambios en el tiempo a falla bajo diferentes niveles térmicos. El procesamiento estadístico (por ejemplo, mediante Minitab u otro software) se realiza de manera general en función de los datos experimentales que se obtengan.

Obtención de Datos de Prueba Física en Shaker Electrodinámico por efecto de la Vibración Aleatoria-Temperatura

En esta etapa es necesario aplicar vibración aleatoria y temperatura de forma simultánea en el shaker electrodinámico para reproducir las condiciones reales de operación y obtener datos experimentales representativos.

Plan de Prueba sin Restricción de Piezas

De acuerdo con GMW3172, los ensayos de vibración deben garantizar una confiabilidad mínima de 0.97 con un intervalo de confianza de 0.50, empleando la distribución de Weibull para equilibrar el tiempo de prueba y el tamaño de muestra



Plan de Prueba con Restricción de Piezas

Se aborda la limitación del número de muestras disponibles cuando se quiera realizar las pruebas físicas. Se hace mediante la aplicación de un enfoque acelerado que mantiene el modo de falla por fatiga inducida por vibración. Dado que el daño está gobernado por la amplitud y la energía vibratoria, se incrementa la energía del perfil conforme a los lineamientos de GMW3172, permitiendo reducir el tiempo de exposición sin alterar el mecanismo de falla. De esta manera, se determina un tiempo de prueba equivalente que compensa la insuficiencia de piezas y asegura la validez estadística del ensayo.

Determinar indicadores de confiabilidad

Calcular riesgo de falla instantáneo, función de probabilidad de riesgo acumulado y finalmente la confiabilidad.

Resultados

Debido a que la investigación se encuentra en curso, los resultados experimentales y numéricos aún están en proceso de obtención. No obstante, se espera que la aplicación combinada del perfil de vibración aleatoria de la norma ISO 16750-3 y del modelo de vida acelerada térmica basado en Arrhenius permita:

- Obtener el PSD de respuesta mediante simulación (MATLAB/ANSYS) y mediante pruebas experimentales con mesa electrodinámica (*Shaker*).
- Identificar la frecuencia dominante, los niveles de aceleración equivalentes y las zonas críticas del elemento mecánico bajo estudio.
- Ajustar los tiempos a falla a una distribución de Weibull para estimar vida B10, vida media y parámetros de confiabilidad.
- Determinar la influencia relativa de vibración aleatoria y temperatura en la reducción de la vida útil del componente.

Los resultados finales se presentarán considerando los indicadores de confiabilidad obtenidos a partir del análisis estático, modal, de vibración aleatoria y de vida acelerada.

Análisis

El análisis se enfocará en interpretar el PSD de respuesta, identificando las frecuencias dominantes y los niveles de aceleración que generan mayor daño en el elemento mecánico. Los datos obtenidos de las simulaciones y pruebas experimentales se procesarán mediante Weibull para estimar la vida útil y mediante el modelo de Arrhenius para evaluar el efecto de la temperatura. Finalmente, se integrarán ambos resultados para determinar la confiabilidad bajo condiciones combinadas de vibración aleatoria y estrés térmico.

Conclusiones

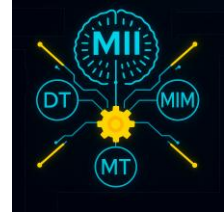
La integración simultánea de vibración aleatoria y temperatura es esencial para representar de manera realista los mecanismos de daño presentes en aplicaciones automotrices. La evidencia documental y los reportes de la NHTSA confirman que las fallas asociadas a cargas combinadas constituyen un riesgo real que exige planes de validación más robustos.

La selección del elemento mecánico, la identificación de su ubicación y la elección adecuada del perfil de carga permiten definir con precisión las condiciones operativas críticas, asegurando que la prueba refleje el entorno real de servicio.

Recomendaciones

Investigar estrategias de diseño orientadas a la mitigación, como cambios en soportes, fijaciones, materiales o aislamiento vibro-térmico, basadas en los resultados de confiabilidad obtenidos. Además, también, validar la metodología en distintos sectores industriales (aeroespacial, ferroviario, naval) para ampliar su aplicabilidad y evaluar la sensibilidad del modelo en diferentes condiciones operativas. Estas actividades futuras permitirán ampliar el entendimiento del fenómeno vibración-temperatura y fortalecer el desarrollo de planes de prueba cada vez más representativos y predictivos para la ingeniería mecánica.

Referencias



Bathias, C. y Pineau, A. *Fatigue of Materials and Structures*. Londres / Hoboken: ISTE Ltd. y John Wiley & Sons, 2010. ISBN 978-1-84821-051-6.

Budynas, R. G. y Nisbett, J. K. *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. 10.^a ed. Ciudad de México: McGraw-Hill, 2018. ISBN 978-607-15-1687-0.

Mott, R. L. *Diseño de elementos de máquinas*. 4.^a ed. Ed. por M. Guerrero Rosas y B. M. Gutiérrez Hernández. Naucalpan de Juárez: Pearson, 2006. ISBN 978-970-26-0678-3.

Newland, D. E. *An Introduction to Random Vibrations, Spectral and Wavelet Analysis*. 3rd ed. Harlow: Longman Scientific & Technical / Prentice Hall PTR, 1996. ISBN 0582215846.

Vanegas Useche, L. V. *Diseño de elementos de máquinas*. 1.^a ed. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira, 2018.

International Organization for Standardization. *ISO 16750-3: Road Vehicles — Environmental Conditions and Testing for Electrical and Electronic Equipment — Part 3: Mechanical Loads*. 2nd ed. Geneva: ISO, 2007.

Edson, L. *The GMW3172 Users Guide: Electrical Component Testing*. Revision 19, 2/13/08. General Motors Corporation, 2008.

National Highway Traffic Safety Administration. Recall Report RCLRPT-24V321-4322. U.S. Department of Transportation, 2024.

National Highway Traffic Safety Administration. Recall Report RCLRPT-23E017-1651. U.S. Department of Transportation, 2023.

National Highway Traffic Safety Administration. Recall Report RCLRPT-19V312-1746. U.S. Department of Transportation, 2019.

National Highway Traffic Safety Administration. Recall Report RCLRPT-24V106-3423. U.S. Department of Transportation, 2024.

Anexos

No aplica.