

# Evaluación de Vibraciones de Cuerpo Entero según Normativas Vigentes

Martín I. Lucero<sup>#1</sup>, José E. Stuardi<sup>#2</sup>, Marcelo A. Ceballos<sup>#3</sup>

<sup>#</sup> *Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales - Universidad Nacional de Córdoba, Av. Vélez Sársfield 1611, X5016GCA, Córdoba, Argentina*

<sup>1</sup> martinlucero@live.com.ar

<sup>2</sup> jstuardi@gmail.com

<sup>3</sup> mceballo@efn.uncor.edu

**Resumen** — En el presente trabajo se implementan distintas normativas para la evaluación de vibraciones incidentes sobre cuerpo humano completo mediante uso de un código computacional. Esto permite realizar un análisis y evaluación cuantitativa de registros de vibraciones de acuerdo con los estándares vigentes ISO 2631-1:1997, VDI 2057 Parte 1 2002 y BS 6841:1987. El objetivo es contar con un complemento de un vibrómetro básico que, mediante una interfaz intuitiva, permita al operador un rápido y eficaz encuadre dentro del a menudo complejo texto de las normas y brinde una cuantificación del efecto de la vibración por medio de los descriptores adecuados. Se describe la implementación numérica en una aplicación en la plataforma Matlab, incluyendo la conversión de los filtros analógicos en digitales en el dominio del tiempo. El presente desarrollo tiene como motivación la escasa flexibilidad de los equipos comerciales, que están limitados a procesamientos específicos y restringen la posibilidad de realizar estudios más detallados y la investigación. El programa fue validado convenientemente y su performance y potencialidad se demuestra por medio de aplicaciones prácticas de interés.

**Abstract** — We present the computer implementation of different standards for the evaluation of human exposure to whole-body vibration. The resulting computer tool enables assessment and quantitative analysis of vibration records in accordance with current standards ISO 2631-1:1997, VDI 2057 Part 1 2002, and BS 6841:1987. The objective is to provide a user-friendly computer system, as a complement to a basic vibrometer, which provides a quick and effective quantification of vibration effects using appropriate descriptors. The numerical implementation of a Matlab code is described, including the conversion of analog filters to digital in the time domain. The development of the computer tool presented here was motivated by the lack of flexibility found in commercial equipment; although commercial vibrometers satisfy basic requirements, they are limited to specific processing and restrict the possibility of a thorough study or research. The performance and potentiality of the computer tool, which has been conveniently validated, are illustrated through examples of practical interest.

## I. INTRODUCCIÓN

La exposición de una persona a vibraciones mecánicas causa una compleja distribución de movimientos oscilatorios y fuerzas en el cuerpo humano. Tales efectos pueden causar incomodidades o daños psicofísicos temporales o permanentes en el individuo [1]. Debido a esto, se dispone actualmente de una gran cantidad de medidas preventivas que reducen o eliminan el riesgo [2], asociado a cada actividad humana y su área de influencia.

El presente trabajo aborda el estudio de las vibraciones incidentes sobre el cuerpo humano completo mediante la aplicación numérica de los estándares ISO 2631-1:1997 [3], VDI 2057 Parte 1 2002 [4] y BS 6841:1987 [1]. En estas normas se definen los métodos para evaluar una exposición a una vibración y se proporcionan los efectos más probables que pueden presentarse.

La aplicación práctica de estas normas se realiza normalmente mediante el uso de vibrómetros especializados, que proporcionan valores descriptores de una norma. Estos vibrómetros poseen prestaciones poco flexibles, lo que se evidencia cuando se pretende realizar estudios exhaustivos. En general su uso requiere del acompañamiento de las normas y son de carácter modular, por lo que la integración de todo un estándar (o varios) resulta costoso.

En este trabajo se describe la aplicación numérica de las normas citadas proporcionando además la guía necesaria para su interpretación, ya que particularmente la ISO 2631-1:1997 resulta confusa y en cierta forma desconcertante [5]. Esto sucede así también con la VDI 2057 Parte 1 2002, debido a que está basada en la ISO.

Para la implementación numérica de estas normas se realizó una conversión de los filtros analógicos presentes en las normas, en filtros digitales en el dominio del tiempo [6] y se validaron los mismos mediante el procedimiento descrito en la ISO 8041:2005. El análisis de los efectos de las vibraciones se realizó basándose en las recomendaciones y límites presentes en los anexos de los estándares.

El objetivo de este trabajo es entonces generar un sistema capaz de evaluar los efectos de las vibraciones incidentes sobre el cuerpo humano completo, basándose en las normas ISO 2631-1:1997, VDI 2057 Parte 1 2002 y BS 6841:1987. La herramienta permite al operador trabajar sin necesidad de consultas adicionales de las normas y de manera intuitiva.

### A. Equipos de Medición Actuales. Vibrómetros

En la actualidad se dispone de equipos comerciales que realizan la tarea de medida y análisis de la vibración, dejando la evaluación como tarea para el usuario; como por ejemplo el Vibrómetro RION VM54 + tarjeta VX-54WB [7] mostrado en la Fig. 1, el PCE VM30 [8], NORSONIC NOR133/136 [9], CESVA VC431 [10], y CASELLA CEL-960 [11]. Todos estos equipos certifican la ISO 8041:2005 [12] y satisfacen las expectativas de un operador sin mayores necesidades que obtener un valor representativo. Sin embargo resultan poco flexibles y su uso debe ser complementado con el texto de las normas. En general no permiten la extracción de los datos primarios para un

análisis alternativo, ni realizan un análisis bajo distintas normas.



Fig. 1. Vibrómetro modular RION VM54 [7].

## II. EVALUACIÓN DE LAS VIBRACIONES

La evaluación de una vibración se realiza comparando valores descriptores de la señal primaria filtrada con los de referencia proporcionados en los anexos de los estándares. Los descriptores se obtienen procesando convenientemente registros de mediciones realizadas basándose en un sistema de referencia basicéntrico determinado, según sea la postura de la persona y la dirección de vibración.

### A. Ejes de Referencia Sobre el Cuerpo Humano

Para las tres normas utilizadas, los ejes se encuentran definidos solidarios al cuerpo humano tal y como se muestra en la Fig. 2. La definición de estos ejes depende de la posición adoptada por la persona y se observa que en todos los puntos de medición (asiento, respaldo, pies, cabeza y torso) están definidos los tres ejes traslacionales y solo en el asiento los tres ejes rotacionales. Esto se debe a que no se ha comprobado aún la influencia significativa del resto de los ejes rotacionales sobre los efectos que pueden causar las vibraciones rotacionales. Los nombres proporcionados a los ejes traslacionales son los horizontales Tx y Ty, el vertical Tz; y para los rotacionales son el rodaje Rx, el cabeceo Ry y el viraje Rz.

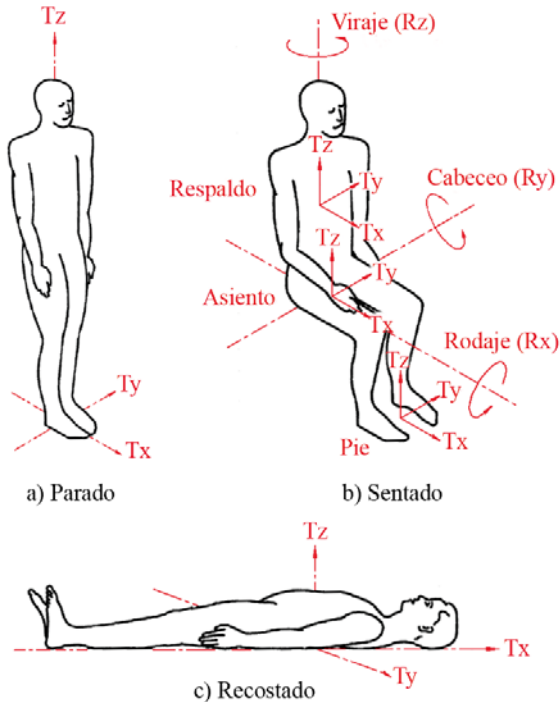


Fig. 2. Sistema de coordenadas definidos sobre el cuerpo humano en función de la postura y punto de medición [1].

### B. Descriptores

Los descriptores son magnitudes que representan a la totalidad de la exposición a la vibración, por lo tanto existen diferentes descriptores para distintos tipos de exposiciones. Desde una perspectiva general, las normas distinguen la evaluación en estándar ó especial según sea el factor de cresta FC (Ec. 1) de la vibración filtrada.

$$FC = \frac{\max(|a_w(t)|)}{RMS} \quad (1)$$

Donde

- $a_w(t)$  es la aceleración filtrada en  $[m/s^2]$  o  $[rad/s^2]$
- RMS es el valor medio cuadrático definido en la Ec. 2

En la Tabla I se muestran todos los descriptores y su utilización en función del valor del FC.

TABLA I  
DESCRITORES UTILIZADOS SEGÚN EL FC DE LA SEÑAL FILTRADA

Descriptor	ISO	VDI	BS
RMS	FC < 9,0		FC < 6,0
MTVV	FC > 9,0		-
RMQ			-
VDV	FC > 9,0	-	FC > 6,0 o para FC < 6,0 mediante una conversión
MSDV	Se utiliza solo para evaluar la cinetosis		

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a_w^2(t) dt} \quad (2)$$

$$MTVV = \max \left[ \sqrt{\left\{ \frac{1}{\tau} \int_{\xi=0}^t a_w(\xi)^2 \exp \left[ \frac{\xi-t}{\tau} \right] d\xi \right\}} \right] \quad (3)$$

$$RMQ = \sqrt[4]{\frac{1}{T} \int_0^T a_w^4(t) dt} \quad (4)$$

$$VDV = \sqrt[4]{\int_0^T a_w^4(t) dt} \quad (5)$$

$$MSDV_z = \sqrt{\int_0^T [a_w(t)]^2 dt} \quad (6)$$

Donde

- T es la duración del registro en [s]
- $\xi$  es la variable de integración en [s]
- $\tau$  es el tiempo constante de integración para el promediado RMS, en [s] ( $\tau = 1$  s para ISO y  $\tau = 0,125$  s para VDI).

Particularmente, para la evaluación de los efectos en la salud de una persona expuesta a una vibración, el único valor descriptor cuya magnitud incrementa con el tiempo de exposición es el VDV, tal como se muestra en la Ec. 5, ya que no se encuentra dividido por el tiempo total de exposición o duración del registro T. Para considerar los efectos del tiempo de exposición con el RMS, en la ISO y

VDI se utiliza alguna de las equivalencias energéticas de las ecuaciones 7 y 8.

$$\text{RMS}_1 T_1^{1/2} = \text{RMS}_2 T_2^{1/2} \quad (7)$$

$$\text{RMQ}_1 T_1^{1/4} = \text{RMQ}_2 T_2^{1/4} \quad (8)$$

Donde

- $\text{RMS}_1$  o  $\text{RMQ}_1$  son los valores descriptores asociados al tiempo de medición  $T_1$ .
- $\text{RMS}_2$  o  $\text{RMQ}_2$  son los valores descriptores asociados al tiempo de evaluación  $T_2$ . Usualmente  $T_2$  se establece en 4 u 8 horas ya que en tales tiempos se posee mayor evidencia experimental sobre los efectos que pueden presentarse. Estos valores descriptores son los que se utilizan para realizar la evaluación.

El descriptor MTVV (Ec. 3) es más sensible a los picos de la vibración que el RMS (Ec. 2), ya que se trata del máximo valor absoluto RMS calculado en una ventana de tiempo  $\tau$  a lo largo de toda la medida. El valor RMQ (Ec. 4) también es más sensible a los picos altos que el RMS debido a que la potencia cuarta acrecienta la influencia de los picos altos y atenúa los bajos. El descriptor MSDV (Ec. 6) incrementa con el tiempo de exposición y es utilizado únicamente para evaluar la cinetosis.

### C. Vibración Multidireccional y en Más de un Punto

Una exposición real de una persona a una vibración suele ingresar al cuerpo humano por más de uno de los ejes definidos en la Fig. 2, como también puede ingresar por más de uno de los puntos de medición. Es por esta razón que las normas definen las Ec. 9, 10 y 11 para combinar los descriptores obtenidos sobre cada uno de los ejes en los que la vibración fue medida, y las Ec. 12 y 13 para combinar los descriptores de cada uno de los puntos de medición, siempre y cuando la norma a evaluar lo indique. Esta combinación de los descriptores de varios ejes o varios puntos de medición, es sugerida cuando tales descriptores poseen valores comparables entre sí.

$$\text{RMS}_{t_i} = \sqrt{k_x^2 \text{RMS}_x^2 + k_y^2 \text{RMS}_y^2 + k_z^2 \text{RMS}_z^2} \quad (9)$$

$$\text{RMQ}_{t_i} = \sqrt[4]{\text{RMQ}_x^4 + \text{RMQ}_y^4 + \text{RMQ}_z^4} \quad (10)$$

$$\text{VDV}_{t_i} = \sqrt[4]{\text{VDV}_x^4 + \text{VDV}_y^4 + \text{VDV}_z^4} \quad (11)$$

$$\text{RMS}_f = \sqrt{\text{RMS}_{t_1}^2 + \dots + \text{RMS}_{t_n}^2} \quad (12)$$

$$\text{RMQ}_f = \sqrt[4]{\text{RMQ}_{t_1}^4 + \dots + \text{RMQ}_{t_n}^4} \quad (13)$$

Los factores de multiplicación  $k$  [1], [3] que aparecen definidos en la Ec. 9 surgen debido a que la mayoría de los estudios experimentales de los efectos de las vibraciones sobre el cuerpo humano se han realizado sobre el eje vertical  $T_z$ , y para extender los límites de exposición los demás ejes, se han determinado constantes de proporcionalidad de efectos entre ejes. Las referidas constantes de proporcionalidad son los coeficientes  $k$ . Sin embargo, no todos los estándares los definen por lo que la introducción o no de estos factores provoca una gran variación en los resultados de la evaluación.

### D. Segmentos de Vibración

Una exposición completa a una vibración puede estar compuesta por exposiciones más cortas o intermitentes, como por ejemplo la que percibe una persona que trabaja con una estampadora grande durante una jornada laboral en donde existe un receso a medio día. Estas exposiciones intermitentes son denominadas segmentos de exposición y deben ser combinados adecuadamente para que el descriptor final obtenido sea representativo de la exposición completa.

La composición de varios segmentos de exposición se realiza según las Ec. 14 a 16, donde la Ec. 14 y 15 realizan una ponderación del descriptor respecto a la duración  $T_i$  de la vibración de cual fue extraído, y la Ec. 16 incluye la consideración del tiempo de exposición en la definición del VDV (Ec. 5).

$$\text{RMS}_{\text{eq}} = \sqrt{\frac{\sum \text{RMS}_i^2 T_i}{\sum T_i}} \quad (14)$$

$$\text{RMQ}_{\text{eq}} = \sqrt[4]{\frac{\sum \text{RMQ}_i^4 T_i}{\sum T_i}} \quad (15)$$

$$\text{VDV}_{\text{eq}} = \sqrt[4]{\sum \text{VDV}_i^4} \quad (16)$$

## III. CRITERIOS DE EVALUACIÓN

Cada una de las normas especifica distintos *Criterios de Evaluación* respecto a una exposición a una vibración. Estos criterios son la salud, el confort, la percepción, la cinetosis o enfermedad de barcos y, por último, la *performance* de actividades como manipulación y visión.

En la Tabla II se muestran los criterios que evalúa cada norma y además si proporcionan suficiente información para efectuar la evaluación.

TABLA II  
CRITERIOS DE EVALUACIÓN CONSIDERADOS POR CADA NORMA

Criterio	ISO	VDI	BS
Salud	✓	✓	✓
Confort	✓	⚠	✓
Percepción	✓	✓	✓
Cinetosis	✓	✓	✓
Performance	✗	⚠	✓

- ✓ Criterio considerado
- ⚠ Menciona el criterio, no proporciona información suficiente
- ✗ Criterio no considerado

La norma ISO no es suficientemente clara en el caso de que se esté evaluando una vibración con un  $FC > 9,0$ , ya que determina que se debe calcular alguno de los descriptores especiales (MTVV, RMQ, VDV) pero no indica contra que valores referenciarlos, por lo tanto no se puede obtener el resultado de la evaluación. En la VDI sucede lo mismo al estar ésta basada en la ISO, por ende, la norma más clara y confiable resulta ser la BS ya que no presenta estos problemas.

### A. Salud

El rango de frecuencias que más afecta a la salud de una persona es de 0,5 a 80 Hz. El descriptor que se utiliza para evaluar es el RMS si  $FC < 9,0$  o 6,0 según la norma, y si el  $FC$  es mayor a los límites se utiliza el VDV en ISO y BS o

el MTVV en ISO y VDI. Además, es necesario efectuar la equivalencia energética según la Ec. 7 o Ec. 8 hacia todo el tiempo de exposición para realizar la comparación con los valores de referencia presentes en los anexos de los estándares.

### B. Confort

El rango de frecuencias que más afecta al confort de una persona es de 0,5 a 80 Hz. El descriptor que se utiliza para evaluar es el RMS si  $FC < 9,0$  o  $6,0$  según la norma, y si el FC es mayor a los límites se utiliza el RMQ en BS o el MTVV en ISO y VDI. Debido a que se considera que el confort es independiente del tiempo de exposición, no es necesario efectuar la equivalencia energética del descriptor para realizar la comparación con los valores de referencia presentes en los anexos de los estándares.

### C. Percepción

El rango de frecuencias que más afecta a la percepción de una persona es de 0,5 a 80 Hz. El descriptor que se utiliza para evaluar es el RMS si  $FC < 9,0$  o  $6,0$  según la norma, y si el FC es mayor a los límites se utiliza el MTVV en ISO y VDI. Al igual que el confort, la percepción no depende del tiempo de exposición por lo tanto el descriptor obtenido es el que se compara con los valores de referencia presentes en los anexos de los estándares.

### D. Cinetosis

El rango de frecuencias que más afecta a la percepción de una persona es de 0,1 a 0,5 Hz. El descriptor que se utiliza para evaluar es el MSDV independiente del FC, y la probabilidad de que la población expuesta a la vibración se descomponga es 1/3 de MSDV con una variabilidad de hasta un 70%. Además, debido a que esta probabilidad incrementa con el tiempo de exposición, el MSDV incrementa con el mismo.

### E. Performance

El rango de frecuencias que más afecta a la percepción de una persona es de 1 a 80 Hz. El descriptor que se utiliza para evaluar es el RMS si el  $FC < 9,0$  o  $6,0$  según la norma, en caso contrario de debe buscar información adicional. Al igual que el confort y la percepción, la performance no depende del tiempo de exposición por lo tanto el descriptor obtenido es el que se compara con los valores de referencia presentes en los anexos de los estándares.

## IV. ANÁLISIS Y REQUISITOS DEL PROGRAMA

Para que el programa sea competente debe cumplir con todos los requisitos de la norma ISO 8041:2005 que le sean aplicables. Las pautas consecuentemente fijadas que el programa EVCH (Evaluación de Vibraciones de Cuerpo Humano) debe cumplir son las siguientes: [12].

- proveer datos generales tal como valores medios, duración del registro, filtro aplicado, etc. (*Características generales*)
- utilizar simbología correcta, mostrar la aceleración filtrada y opcionalmente los coeficientes  $k$  utilizados (*Presentación*).
- proveer *Precisión* de los descriptores bajo condiciones de referencia estándar.

- utilizar los mismos filtros presentes en la ISO 2631-1:1997 (*Filtros y respuesta en frecuencia*).
- permitir el control de la duración del registro de la aceleración (*Promediado de tiempo*).
- permitir la revisión de la constante  $\tau$  utilizada en el MTVV.
- mostrar el tiempo utilizado para el cálculo de los descriptores (*Facilidad de cronometrado*).
- mostrar el número y año del estándar que aplica (*Marcado del instrumento*).
- proveer de la certificación de la ISO 8041:2005.

## V. DESARROLLO DEL PROGRAMA

El programa EVCH está enteramente desarrollado en plataforma Matlab y es capaz de aplicar las tres normas tratadas en este trabajo, obteniendo rápidamente un resultado.

### A. Procesamiento de Señales

El procesamiento de la vibración medida se realiza a través de las funciones internas de Matlab: *butter*, *bilinear* y *filter*. Las dos primeras funciones precisan de las frecuencias de resonancia y factores de calidad presentes en las normas y devuelven los coeficientes  $a_i$  y  $b_i$  de la Ec. 17, forma genérica de un filtro en el dominio z. La tercera función, *filter*, precisa de estos últimos coeficientes y devuelve la señal filtrada.

$$H(z) = \frac{b_i z^{-i} + b_{i-1} z^{-(i-1)} + \dots + b_0}{a_i z^{-i} + a_{i-1} z^{-(i-1)} + \dots + a_0} \quad (17)$$

En la Tabla III se muestra la composición de cada filtro definido en las normas. Cada uno de estos se encuentra compuesto por una disposición en cascada de un filtro componente pasa bajos  $H_l(s)$ , otro pasa altos  $H_h(s)$  y otro escalón  $H_s(s)$  o uno de transición aceleración velocidad  $H_t(s)$ , o ambos. Además en los filtros de la BS se agrega una constante de proporcionalidad  $G$  ya que estos se pueden obtener a partir de los de la ISO [6]. En la Fig. 3 se muestra el espectro de frecuencias de cada filtro.

TABLA III  
COMPOSICIÓN DE LOS FILTROS DE LAS NORMAS

ISO & VDI	
Filtro	Filtros Componentes
Wc	$H_h(s) \cdot H_l(s) \cdot H_t(s)$
Wd	$H_h(s) \cdot H_l(s) \cdot H_t(s)$
We	$H_h(s) \cdot H_l(s) \cdot H_t(s)$
Wf	$H_h(s) \cdot H_l(s) \cdot H_t(s) \cdot H_s(s)$
Wj	$H_h(s) \cdot H_l(s) \cdot H_s(s)$
Wk	$H_h(s) \cdot H_l(s) \cdot H_t(s) \cdot H_s(s)$
BS	
Filtro	Filtros Componentes
Wb	$G \cdot H_h(s) \cdot H_l(s) \cdot H_t(s) \cdot H_s(s)$
Wc	$G \cdot H_h(s) \cdot H_l(s) \cdot H_t(s)$
Wd	$G \cdot H_h(s) \cdot H_l(s) \cdot H_t(s)$
We	$G \cdot H_h(s) \cdot H_l(s) \cdot H_t(s)$
Wf	$G \cdot H_h(s) \cdot H_l(s) \cdot H_t(s) \cdot H_s(s)$
Wg	$G \cdot H_h(s) \cdot H_l(s) \cdot H_t(s)$

### B. Rutinas y Algoritmos

Desde una perspectiva general, y debido a las particularidades que trata cada norma, el código del EVCH se encuentra separado en tres; es decir un conjunto de códigos

para cada norma. En la Fig. 4 se resume la estructura y forma de funcionamiento del EVCH que además guía al usuario evitando que cometa errores y permite análisis sólo considerados por las normas.

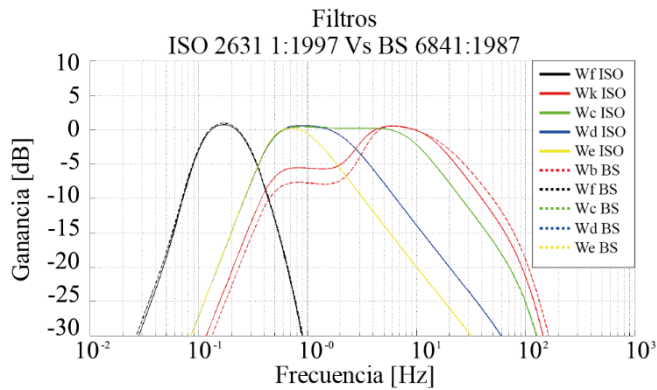


Fig. 3. Espectro de frecuencias de los filtros de la ISO y BS.

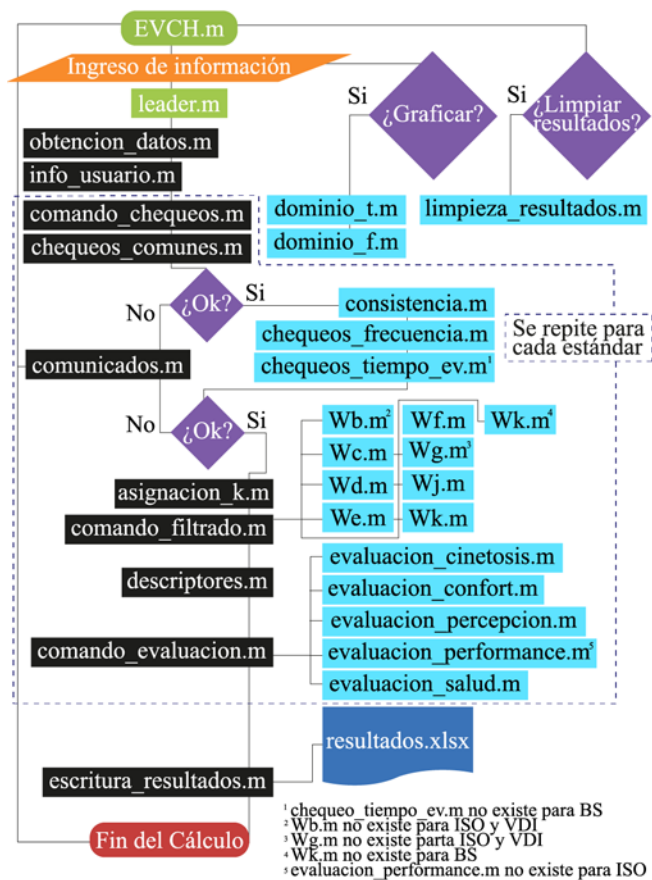


Fig. 4. Rutinas y diagrama de flujo del EVCH.

La función *EVCH.m* es la encargada de comandar la interfaz y de accionar las demás funciones generales, además del graficado de los datos primarios con las funciones *dominio\_t.m* y *dominio\_f.m*, y limpieza de resultados con *limpieza\_resultados.m*. La función *obtencion\_datos.m* extrae los datos del archivo en formato ASCII (1º columna de tiempos y 2º columna de aceleraciones) y la función *info\_usuario.m* toma toda la información proporcionada por el usuario a la interfaz del programa. La función *comando\_chequeos.m* realiza la gestión de los chequeos (*chequeos\_comunes.m*, *consistencia.m*, *chequeo\_frecuencia.m*, *chequeo\_tiempo\_ev.m*, y *comunicados.m*) para que se evalúe indefectiblemente según lo indica la norma selec-

cionada. La función *asignacion\_k.m* asigna el valor *k* correspondiente, la función *comando\_filtrado.m* gestiona el filtrado según los filtros de la Tabla III, *descriptores.m* obtiene todos los descriptores de las Ec. 2 a 6, la función *comando\_evaluacion.m* gestiona la evaluación según el criterio seleccionado y, por último, la función *escritura\_resultados.m* imprime los resultados en una hoja en formato Excel.

### C. Interfaz

La interfaz del programa consta de cuatro grandes secciones y se muestra en la Fig. 5. Se desarrolló enteramente en el módulo *guide* de Matlab.

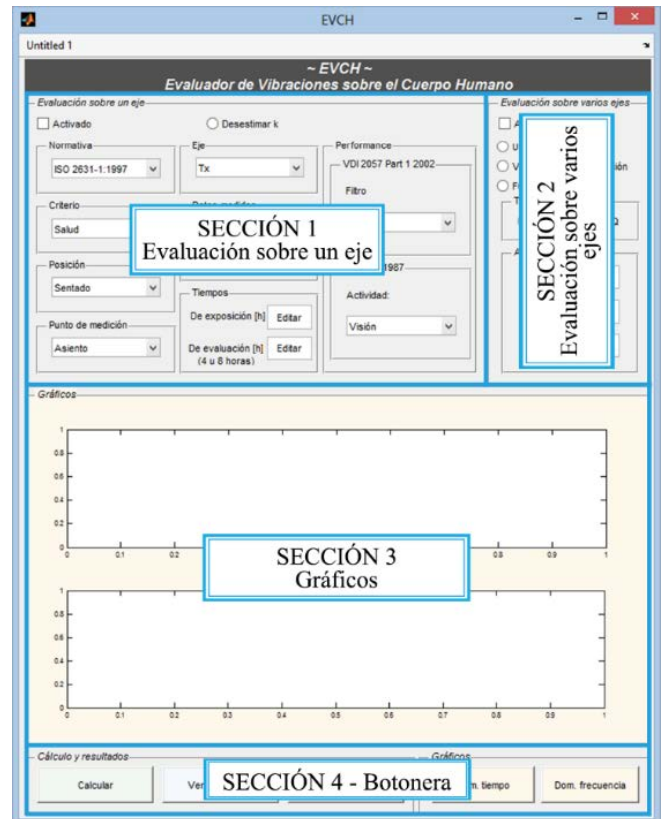


Fig. 5. Secciones del EVCH.

La sección 1 (Evaluación sobre un eje) establece la norma, el criterio a evaluar y todas las condiciones en que se realiza la medición, además de la carga del archivo de datos para efectuar la evaluación sobre un solo eje de medición. La sección 2 (Evaluación sobre varios ejes) permite el ingreso de la información para efectuar una evaluación sobre varios ejes o varios puntos de medición; es decir que aplica las Ec. 9 a 13. La sección 3 (gráficos) es donde se ilustran los datos primarios en el dominio del tiempo y de la frecuencia y, por último, en la sección 4 (botonera) es donde se comanda el cálculo, la visualización de los resultados, la limpieza de los resultados y el graficado.

### D. Validación

La validación se realizó ingresando al programa señales según lo especifica la ISO 8041:2005, y calculando luego los descriptores de la señal filtrada. Estos valores se contrastaron con los proporcionados por la norma y se obtuvo una máxima variación de 4,64%, siendo la permitida de 10%. Debido a que los filtros de la VDI son los mismos

que los de la ISO, y que además los filtros de la BS se pueden obtener a partir de los de la ISO [6], se confirma la validez del programa. Para verificar esta validez es necesario desestimar los coeficientes  $k$ , ya que lo que se está comprobando es que los filtros estén dentro de las tolerancias de las normas ISO, VDI y BS.

## VI. APLICACIONES Y RESULTADOS

A continuación se resumen algunas aplicaciones de interés, para más detalles y aplicaciones ver referencia [13].

### A. Efectos de sobrepaso de Reductores de Velocidad

Se evalúa el efecto en la salud de un chofer que sobrepasa numerosos reductores de velocidad (RDV) con su vehículo en su jornada laboral. Se supone que el vehículo es de turismo gama media [14]; el RDV posee un perfil internacionalmente reconocido (sinusoidal de 7.5 m de largo y 0,075 m de alto); el chofer sobrepasa un RDV cada 15 minutos durante una jornada de 10 horas continuas y la velocidad de sobrepaso de los RDV es de 45 km/h. La vibración sobre el asiento del conductor se obtiene ingresando las condiciones anteriores al programa SimuVehi [14], extrayendo consecuentemente un archivo de tiempos y aceleraciones según la especificación del EVCH. Se obtiene que el VDV extendido a 10 horas de exposición resulta  $9,46 \text{ m/s}^{1.75}$ . Ingresando este valor en el EVCH, sección 2, se tilda tipo de cálculo RMQ y  $FC < \text{lim}$ , se obtiene que no hay riesgos en la salud del chofer. Internamente el EVCH compara este valor con el límite de salud presente en la BS, el cual es de  $18,55 \text{ m/s}^{1.75}$  para 10 horas de exposición.

### B. Cinetosis en un Catamarán durante una Excursión

Esta aplicación se basa en datos experimentales obtenidos sobre el catamarán Realico II [13] al realizar una excursión sobre el Lago San Roque de Villa Carlos Paz, Córdoba. El vibrómetro que se utilizó fue el de un teléfono celular Samsung Galaxy SII I9100. Las mediciones fueron realizadas durante la excursión de 1 hora de duración. La cantidad de ocupantes del catamarán fueron 95 personas de ambos sexos por igual. El acelerómetro posee una resolución máxima de  $0,005 \text{ m/s}^2$  y una frecuencia máxima de muestreo de 100 Hz, lo cual es muy superior a la frecuencia de muestreo mínima para la ISO, VDI y BS. El espectro de datos generado por la aplicación muestra picos a 12,5 Hz (750 rpm) y 37 Hz (2220 rpm), ver Fig. 6, las cuales corresponden a las revoluciones del motor en ralentí y en velocidad crucero, respectivamente. Además se nota que las amplitudes de las frecuencias de interés, entre 0,1 Hz y 0,5 Hz, rondan los  $0,01 \text{ m/s}^2$ .

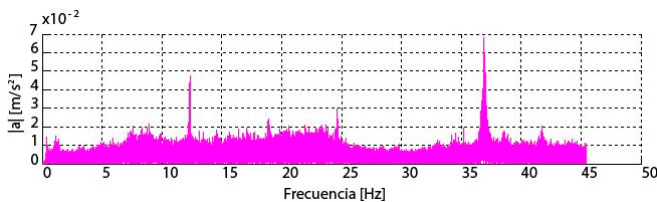


Fig. 6. Espectro de frecuencias de la exposición a cinetosis

Se evaluó con la norma BS obteniéndose un MSDV de 0,1305 y una probabilidad de descompostura media de 0,043%, lo cual indica que 0,041 personas se descomposie-

ron provocando vómito; es decir ninguna, lo cual se correspondió con la realidad.

## VII. CONCLUSIONES

Se desarrolló un programa denominado EVCH, que es un aplicativo de los estándares vigentes ISO 2631-1:1997, VDI 2057 Parte 1 2002 y BS 6841:1987 para la evaluación de las vibraciones de cuerpo completo. El programa constituye un complemento de análisis de registros digitalizados disponibles digitalmente. El EVCH ofrece mayores y mejores prestaciones respecto a los equipos comerciales disponibles por las razones que se resumen a continuación:

- 1) evalúa todos los criterios presentes en las normas e incluye a la norma VDI,
- 2) provee de muchos más datos descriptores de la señal primaria,
- 3) facilita la evaluación de vibraciones al operador, haciendo innecesario la lectura y chequeo del texto de las diversas normativas,
- 4) posee una mayor flexibilidad permitiendo el uso de cualquier filtro y postura,
- 5) admite la evaluación de los descriptores de las normas en casos de vibraciones multidireccionales y vibraciones en distintas posiciones del cuerpo humano,
- 6) grafica los histogramas y espectros de las señales de entrada,
- 7) provee las consecuencias más probables de la exposición a la vibración en base a los valores presentes en los anexos de las normas,
- 8) emite informes completos y claros en formato de tabla con los resultados de la evaluación,
- 9) posee una interfaz agradable y muy intuitiva.

Por medio de las aplicaciones mostradas se ha puesto en evidencia que el programa EVCH constituye una herramienta potente y útil para la evaluación de vibraciones de cuerpo completo, especialmente para el usuario exigente que pretenda realizar análisis profundos e investigación.

## REFERENCIAS

- [1] *Measurement and Evaluation of Human Exposure to Whole-body Vibration and Repeated Shock*, BS Std. 6841, 1987.
- [2] Griffin, M. J., Seidel, H., Bovenzi, M., & Benson, A. J., *Enciclopedia de Salud y Seguridad en el Trabajo*, OIT, Ginebra, Suiza, 2001.
- [3] *Mechanical Vibration Shock – Evaluation of Human Exposure to Whole-body Vibration*, ISO Std. 2631-1, 1997.
- [4] *Human Exposure to Mechanical Vibrations. Whole-body Vibrations*, VDI Std. 2057 Part 1, 2002.
- [5] Griffin, M. J., “A Comparison of Standardized Methods for Predicting the Hazards of Whole-body Vibration and Repeated Shocks”, pp. 883-914, Mar. 1998.
- [6] Rimell, A. N., & Mansfield, N. J., “Design of Digital Filters for Frequency Weightings Required for Risk Assessments of Workers Exposed to Vibration”, pp. 512-519, Apr. 2007.
- [7] Optica Griensu homepage. [Online]. Available: <http://www.opticagriensu.com/opticagriensu/index.php/productos-riem/medidores-de-vibracion/vm-54.html>
- [8] PCE Instruments. homepage. [Online]. Available: <http://www.pce-iberica.es/medidor-detalles-tecnicos/instrumento-de-vibracion/acelerometro-de-vibracion-vm-30h.htm>
- [9] Norsonic. Homepage. [Online]. Available: [http://www.norsonic.no/en/products/vibration/nor133+nor136\\_vibration\\_meters/](http://www.norsonic.no/en/products/vibration/nor133+nor136_vibration_meters/)
- [10] CESVA. homepage. [Online]. Available: <http://www.cesva.com/es/Nuestros-productos/t1101.html>
- [11] CASELLA homepage. [Online]. Available: <http://www.casellameasurement.com/vm-wp-vibrationmeters.htm>
- [12] *Human Response to Vibration - Measuring Instrumentation*, ISO Std. 8041, 2005.
- [13] M. Lucero, “Evaluación de Vibraciones Sobre el Cuerpo Humano Completo. Aplicación Numérica de las Normas ISO2631-1:1997, VDI 2057 Part 1 2002 & BS 6841-1987”, Univ. de Córdoba, 2014.
- [14] P. Fernandez Herbas, “Diseño de reductores de velocidad mediante simulación computacional”, Univ. de Córdoba, 2011.