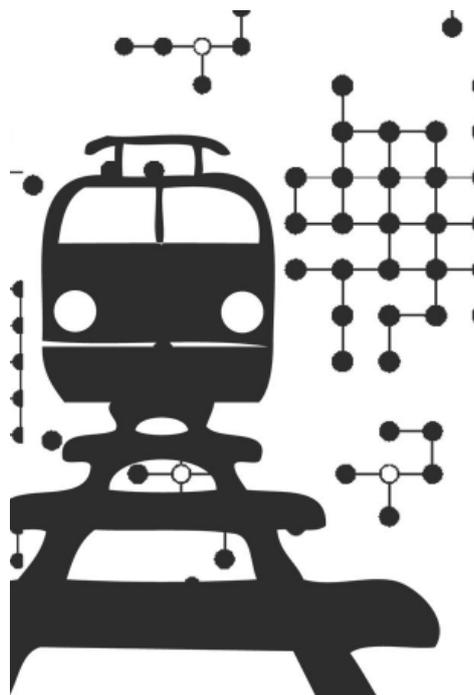


REVISTA Universidad EAFIT
Vol. 43. No. 147. 2007. pp. 81-94

Monitoreo Multidimensional de la condición $-(MMC)$ basado en la descomposición en valores singulares $-(SVD)$ Caso de estudio: Sistema Ferroviario*



Bogdan Zoltowski

University of Technology and Life Sciences,
Faculty of Mechanical Engineering, Bydgoszcz, Poland.
bogzol@mail.atr.bydgoszcz.pl

Leonel Francisco Castañeda Heredia

Profesor del Departamento de Ingeniería Mecánica,
Universidad EAFIT. Investigador del Grupo de Estudios
en Mantenimiento Industrial.
lcasta@eafit.edu.co

Germán René Betancur Giraldo

Profesor del Departamento de Ingeniería Mecánica,
Universidad EAFIT. Investigador del Grupo de Estudios
en Mantenimiento Industrial.
gbetanc4@eafit.edu.co

Recepción: 01 de agosto de 2007 | Aceptación: 15 de septiembre de 2007

Resumen

El monitoreo multidimensional de síntomas aplicado a sistemas férreos permite detectar y localizar los tramos de la vía (rectos y curvos) que generan el decremento de la seguridad y el confort de los pasajeros; así mismo, evaluar el estado técnico de la interfase vía-vehículo. Además permite vigilar, evaluar y controlar la fiabilidad y disponibilidad del sistema.

El objetivo del estudio es proponer una alternativa para evaluar la condición del estado técnico de sistemas ferroviarios desde un punto de vista dinámico que garantice la seguridad y el confort de los pasajeros.

Se busca disminuir los costos operativos de mantenimiento; mejorar el uso de equipos para estas tareas en la vía, el vehículo y equipos auxiliares; optimizar el tiempo del personal de mantenimiento, así como las frecuencias de mantenimientos (correctivo, preventivo, etc.); se busca identificar las variables relacionadas con acciones de mantenimiento que tienen una alta influencia sobre el estado técnico del sistema.

Con el presente artículo se hacen públicos los resultados obtenidos al aplicar una modelación de este tipo a un sistema ferroviario, centrándose principalmente en la aplicación de la teoría SVD al diagnóstico técnico de sistemas.

Multidimensional Condition Monitoring (MCM) based on Singular Value Decomposition (SVD) Case study: A railway system[♦]

Abstract

Multidimensional monitoring of symptoms as applied to railway systems allows detecting and identifying both the curved and straight lots that prejudice the security and comfort of passengers. Additionally, it helps to assess the way-vehicle interface's technical conditions, as well as to monitor, evaluate and control the system's reliability and availability.

This study offers an alternative way to assess the railway systems' technical condition from a dynamic approach guaranteeing the security and comfort of passengers.

The aims of this model are to reduce maintenance operational costs; to enhance the effective employment of equipment used for these tasks on railways, vehicles and auxiliary equipment; to optimize the maintenance staff's time, and the maintenance timing (corrective, preventive, etc.). Also, we aim at identifying variables related to maintenance actions highly influential on the system's technical condition.

In this paper, results obtained from applying a modeling of this type to a railway system are released, and it focuses in the application of the SVD theory to the system's technical diagnosis.

Palabras Clave

Monitoreo Multidimensional de la Condición (MMC)
Descomposición en Valores Singulares (SVD)
Diagnóstico Técnico de Sistemas Ferroviarios

Key Words

Multidimensional Condition Monitoring (MMC)
Singular Value Decomposition (SVD)
Railway

[♦] The authors acknowledge the Group of Industrial Maintenance Studies (GEMI) and especially the company Metro de Medellín Ltda., Colciencias and the Eafit University for their support to this research and for their permission to publish the research results and other information derived from it.

Introducción

Los sistemas técnicos son cada vez más complejos en cuanto a su mecánica y electrónica. Con los avances tecnológicos tienden a ser autónomos en su funcionamiento y a autorealizarse un diagnóstico que permita determinar la existencia de una anomalía en un subsistema o componente y decidir si se detiene o no el sistema.

El mantenimiento convencional no permite realizar un diagnóstico integrado del sistema. Entre los factores que generan esta condición se encuentran una falta de comunicación entre dependencias,

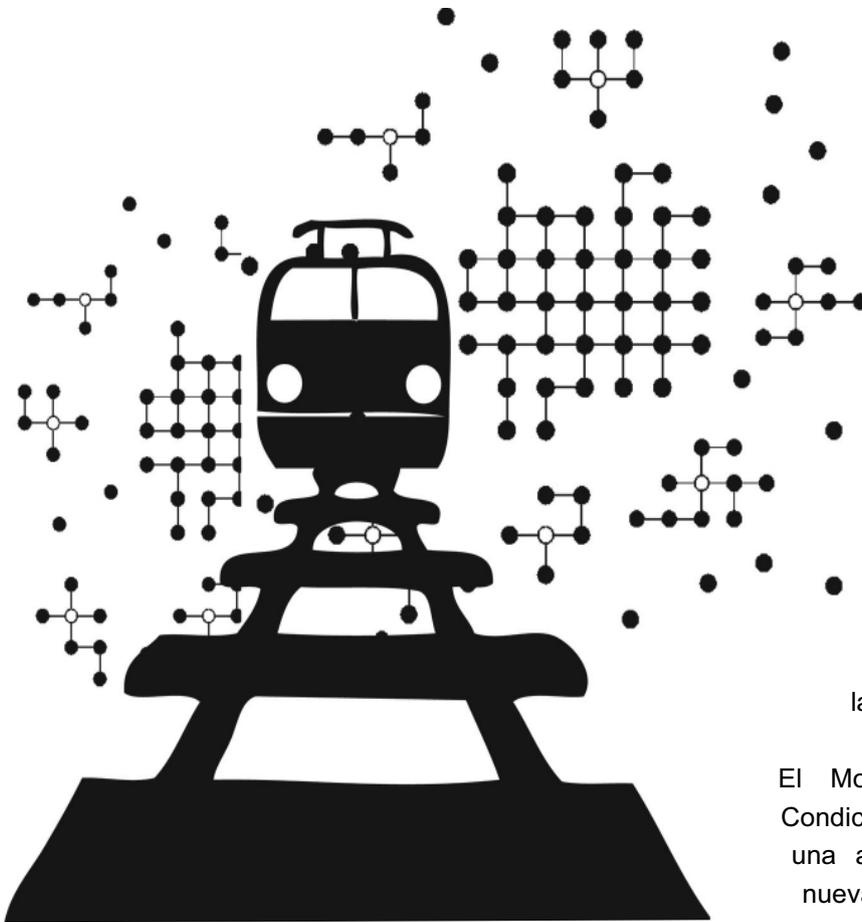
mal manejo de información, desconocimiento de la información relevante, no tener una política clara de monitoreo y tendencia de variables, entre otros.

Por lo tanto es necesario implementar nuevas metodologías de diagnóstico técnico que permitan suplir las necesidades de la empresa, al obtener un diagnóstico integrado a través de herramientas y simulaciones computacionales, con métodos de análisis y evaluación de la información del estado técnico de la máquina.

El Monitoreo Multidimensional de la Condición –(MMC) se desarrolla como una alternativa que se adecua a las nuevas demandas de la tecnología, porque garantiza alcanzar indicadores de gestión como la fiabilidad antes de la

aparición de un daño en el sistema, permitiendo reducir los fallos críticos, los paros inesperados de la producción, tiempos muertos, costos de mantenimiento y el mal uso del recurso humano, entre otros.

La aproximación holística que se puede apreciar en la Figura 1, muestra la información de la dinámica del sistema en operación y el historial de las actividades de mantenimiento, a través de:

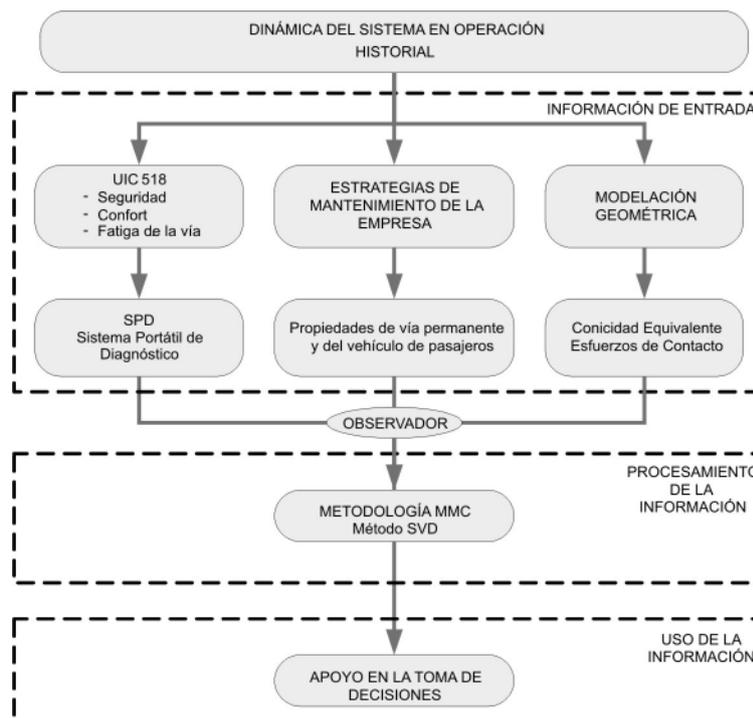


- El Sistema Portátil de Diagnóstico (SPD), el cual registra señales de aceleración y fuerza con el fin de evaluar la seguridad, el confort y la fatiga de la vía según los lineamientos de la norma internacional UIC518.¹
- Las estrategias de mantenimiento de la empresa, considerando las variables de vía permanente y del vehículo.
- Una modelación geométrica de la interfase rueda–riel, mediante la cual es posible obtener la conicidad equivalente y los esfuerzos

de contacto, factores que describen dicha relación.

La aproximación holística se basa en la aplicación de la metodología MMC, la cual se fundamenta a su vez en el método de Descomposición en Valores Singulares (SVD), por medio del cual se determina el fallo generalizado del sistema, indicador integral del estado técnico; su evaluación permite mejorar la planificación actual de las acciones de mantenimiento y el aumento en los indicadores de disponibilidad, mantenibilidad y fiabilidad del sistema técnico.

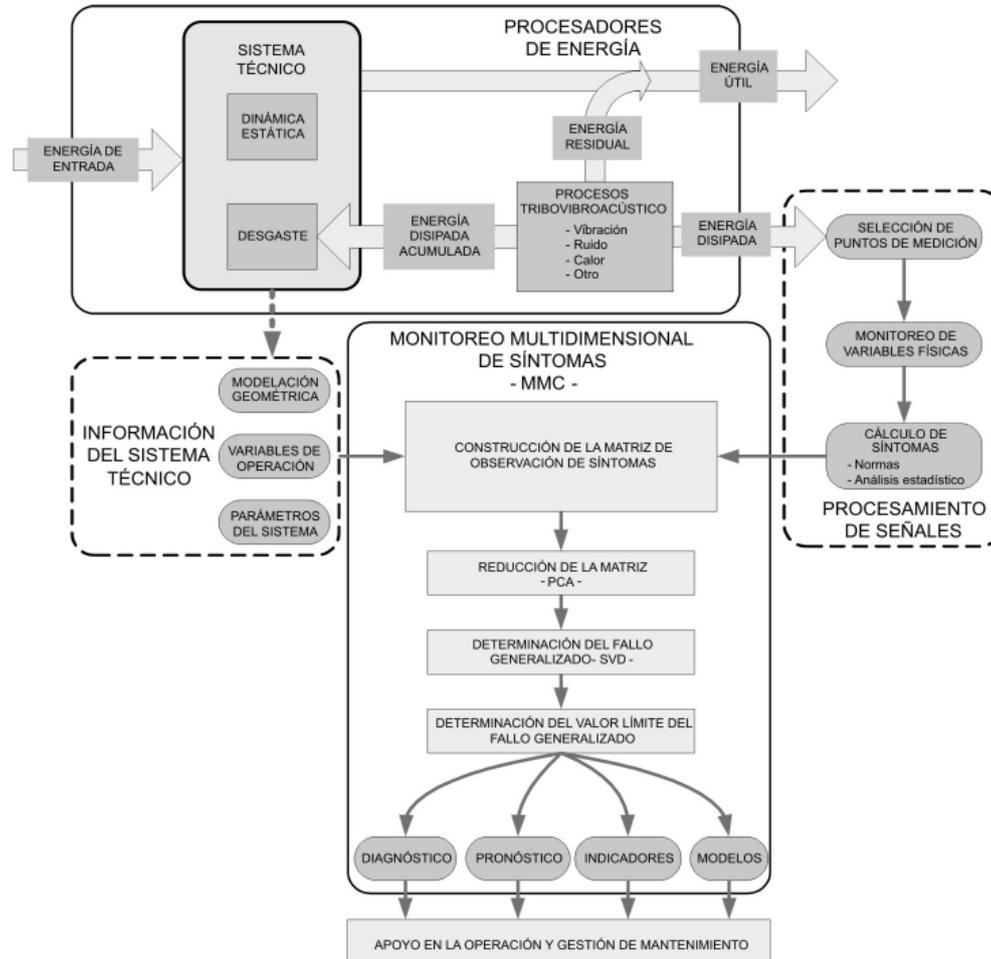
Figura 1. Modelo de diagnóstico con una aproximación holística para sistemas ferroviarios



1. Monitoreo multidimensional de la condición

En la Figura 2 se observa la metodología que se utilizó para el presente estudio. Se advierten allí cuatro grupos principales: en el primero se refleja la teoría de procesadores de energía, en donde mediante el estudio de la energía de salida se puede inferir el estado técnico del sistema y su desgaste; para ello es necesario realizar un procesamiento de señales (segundo grupo), pues los fenómenos como vibración, ruido y calor pueden ser medidos por medio de instrumentación y equipos de adquisición de datos (monitoreo de síntomas).

¹ UIC518. Pruebas y aprobación de vehículos férreos desde el punto de vista de su comportamiento dinámico; seguridad, fatiga de la vía y calidad de marcha (confort).

Figura 2. Metodología para una aproximación holística

En este aparte es importante establecer cuáles puntos de medición de las variables físicas son los idóneos para adquirir información relevante; por tanto, se realiza una selección de puntos de medición, selección que busca establecer el punto que genere la mayor cantidad de información y menor redundancia de ésta sobre el estado técnico del sistema.

Una vez se tengan establecidos los puntos de medición, el monitoreo de variables físicas puede ser realizado garantizando información relevante sobre el sistema; las señales adquiridas son transformadas en una serie de síntomas. Los parámetros de cálculo de estos síntomas se pueden obtener por los lineamientos de alguna norma en particular o por medio de un análisis estadístico de series temporales, en el cual pueden calcularse

escalares básicos de la estadística, como la media, desviación estándar, sesgo, factor de forma, factor de holgura, entre muchos otros. Análisis más complejos como el espectral, el de envolvente, el cepstral, tiempo-frecuencia, ciclo-estacionario y análisis estadístico de orden superior, pueden ser desarrollados para obtener síntomas que reflejen la señal medida. Para el presente estudio, el procesamiento de las señales se realiza a través del SPD.

Un tercer grupo dentro de la metodología lo compone la información propia del sistema técnico, como las variables de operación del sistema, los parámetros del sistema y una modelación geométrica del sistema técnico; entre estas fuentes de información se encuentran una serie de variables periódicamente medidas por el

personal de mantenimiento, las cuales les permiten establecer rutinas y acciones de mantenimiento.

Para realizar un monitoreo multidimensional es necesario como primer paso determinar la matriz de observación de síntomas, que está compuesta por los síntomas en las columnas y las observaciones o mediciones de estos síntomas en las filas. En dicha matriz está contenida la información del estado técnico integral del sistema, y la metodología propuesta busca extraer la información relevante.

La matriz de observación es reducida a través de un Análisis en Componentes Principales (PCA), el cual, junto con una serie de criterios de reducción, permite establecer cuáles síntomas contienen información relevante sobre el estado técnico del sistema.

Basándose en la matriz reducida (espacio de síntomas reducido), mediante la Descomposición en Valores Singulares (SVD) se determina el fallo generalizado que representa la evolución del estado técnico del sistema; es una variable que condensa la información del estado técnico del sistema contenida en principio en la matriz de observación de síntomas.

Una vez determinado el fallo generalizado y su valor límite (a través de métodos estadísticos), es posible realizar un diagnóstico integral del sistema determinando en qué condiciones el fallo generalizado sobrepasa su valor límite. A partir

del fallo generalizado se pueden abordar tareas de pronóstico con el fin de predecir el estado técnico futuro del sistema.

También es posible establecer indicadores del estado del sistema técnico a partir del fallo generalizado, como funciones de confiabilidad y riesgo, indicadores que apoyan el diagnóstico del sistema. Por último, es posible establecer modelos generales (a través de la regresión lineal múltiple) que describen el comportamiento del fallo generalizado, con el fin de ingresar valores actuales, futuros, reales o supuestos al modelo y establecer su influencia sobre el fallo generalizado.

2. Teoría general del SVD

La matriz de observación de síntomas definida por $O_{pr} \in \mathfrak{R}^{r \times p}$, es un arreglo de síntomas en determinados momentos de la vida del artefacto técnico θ ; se puede decir, que la matriz de observación es una forma discreta de observar síntomas (Cempel, 2000a, 2).

El objetivo de obtener una matriz de observación de síntomas es el de extraer de ella toda la información relacionada con la condición de estado del sistema técnico y distinguir diferentes modos de falla que evolucionan durante su operación (Cempel, 2000a, 2). La matriz de observación de síntomas de un sistema está representada de la siguiente manera (Natke & Cempel, 2001, 599):

$$O_{pr} = \{S_{ij}\} = \begin{array}{cccccc} & \text{Síntomas} & & & & \\ & \text{Variables} & & & & \\ \left. \begin{array}{cccccc} S_{1,1} & S_{1,2} & \cdots & S_{1,j} & \cdots & S_{1,r} \\ S_{2,1} & S_{2,2} & \cdots & S_{2,j} & \cdots & S_{2,r} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & & \vdots \\ S_{i,1} & S_{i,2} & \cdots & S_{i,j} & \cdots & S_{i,r} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{p,1} & S_{p,2} & \cdots & S_{p,j} & \cdots & S_{p,r} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \rightarrow \theta_1 \\ \rightarrow \theta_2 \\ \vdots \\ \rightarrow \theta_i \\ \vdots \\ \rightarrow \theta_p \end{array} \end{array} \left. \begin{array}{l} \text{Observaciones } i = 1, 2, \dots, l \\ \text{Mediciones } j = 1, 2, \dots, l \end{array} \right\}$$

Donde las columnas son los diferentes síntomas medidos, y las filas son las observaciones o mediciones realizadas a cada síntoma en diferentes tiempos de vida del sistema técnico.

En ciertos casos, la información en varias columnas puede ser redundante variando ligeramente entre síntomas contenidos en la matriz O_{pr} , ésto se puede evitar por medio de la eliminación de las columnas correspondientes (redundantes) por medio de herramientas como el PCA. Este método se desarrolla a partir de la matriz de correlación y parte de una base estadística como criterio para la síntesis de información, disminuyendo dimensionalidad al problema. Tiene dos características fundamentales:

- Perder la menor cantidad de información, maximizando la varianza total.
- Mantener la independencia lineal, conservando la estructura original de los datos.

Se aplica la descomposición en valores singulares SVD, con el fin de extraer diferentes modos de fallas que evolucionan en un sistema, evaluando el avance del desgaste mediante índices e indicadores.

La aplicación del SVD para dimensionar la matriz de observación de síntomas, se expresa de la siguiente manera (Bongers, 2004, 42; Cempel, 1999, 179; Cempel, 2000a, 4 y 5; Cempel, 2003a, 1293; Cempel, 2003b, 2; Cempel, 2004, 2; Cempel & Tabaszewski, 2003, 216; Cempel & Tabaszewski, 2005, 3; Cempel & Tabaszewski, 2006, 3; Wall, Rechtsteiner & Rocha, 2003, 2):

$$O_{pr} = U_{pp} * \sum_{pr} * V_{rr}^T \quad (1)$$

Donde:

U_{pp} : matriz ortogonal de dimensión p , de los vectores singulares izquierdos

V_{rr} : matriz ortogonal de dimensión r , de los vectores singulares derechos

\sum_{pr} : matriz diagonal de los valores singulares:

$$\sum_{pr} = \text{diag} (\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_i) \quad (2)$$

Los valores singulares σ_1 , son expresados por números y u_t , v_t y , son los vectores singulares (ortogonales) que representan las columnas de sus respectivas matrices $\sum_{pr} U_{pp} V_{rr}$. Estos

vectores están creando a su vez sub-matrices independientes que describen totalmente las modificaciones del sistema operacional, es decir, su evolución, desgaste o sus modos de falla en el tiempo $t = 1, 2, \dots, z$ (Cempel, 2003a, 1293).

Los valores singulares diferentes de cero, $\sigma_t > 0$, indican la falla o el daño; estos valores son utilizados para detectar modificaciones en el sistema y para evaluar sus intensidades. Las intensidades de las fallas se encuentran ordenadas por sus magnitudes tal como lo presenta la diagonal principal de los valores singulares de O_{pr} (Natke & Cempel, 2001, 610).

Los fallos generalizados se determinan usando los valores y vectores singulares σ_t , encontrados por el SVD, así se obtiene una interpretación de la evolución de la condición de estado del sistema técnico. Estos fallos están dados por (Cempel, 1999, 179; Cempel, 2000a, 4 y 5; Cempel, 2003a, 1293; Cempel, 2003b, 2; Cempel, 2004, 2; Cempel & Tabaszewski, 2003, 216; Cempel & Tabaszewski, 2005, 3; Cempel & Tabaszewski, 2006, 3; Wall, Rechtsteiner & Rocha, 2003, 2):

$$SD_t = O_{pr} \times v_t = \sigma_t \cdot u_t \quad (3)$$

Donde SD_t es el vector singular izquierdo amplificado por el valor singular respectivo σ_t . Por lo tanto, este valor lleva información independiente en la forma de fallo y también información en la intensidad de estos fallos por la inclusión de σ_t .

De esta manera, para un tiempo de vida θ del sistema las cantidades $SD_t(\theta)$ y $D_t(\theta)$ son independientes de las otras y sirven como dos índices de las modificaciones del sistema durante su operación. Desde el punto de vista de equivalencia de energía de una norma, se puede decir que: $\sigma_t(\theta)$ puede ser tratado como un índice del avance del desgaste (intensidad), mientras que el $SD_t(\theta)$ es la forma momentánea durante la evolución de la condición de estado del sistema (Cempel, 2003a, 1294).

Un índice de los varios que se pueden obtener mediante el SVD es el perfil del fallo generalizado

total θ , el cual representa la evolución del estado general del sistema técnico y es determinado mediante (Cempel, 2003a, 1296; Cempel & Tabaszewski, 2005, 4):

$$P(\theta) = \text{SumSD} = \sum_{i=1}^z |SD_i(\theta)| \quad (4)$$

El perfil total de los fallos generalizados será usado para describir el estado técnico del sistema objeto de estudio y será nombrado a partir de este punto sólo como fallo generalizado. Por medio de éste es posible realizar tareas de diagnóstico, pronóstico, establecer algunos indicadores adicionales del estado del sistema técnico y definir modelos de estado.

3. Implementación del Monitoreo Multidimensional de la Condición

Se realiza la implementación del monitoreo multidimensional de síntomas en un sistema ferroviario tipo metro, se presentan las fuentes de información del estado técnico del sistema, las condiciones consideradas para la implementación y los resultados obtenidos por medio de una herramienta computacional basada en la metodología propuesta.

3.1 Descripción del experimento

El análisis se centra en una vía férrea comercial, para una muestra de 16 tramos rectos y 37 tramos curvos aproximadamente; de igual manera se tiene una muestra representativa de vehículos de pasajeros (17 de una flota de 42).

Los síntomas relacionados son los estimadores considerados por la norma internacional UIC-518 para la evaluación de la seguridad, el confort y el desgaste o fatiga de la vía, las propiedades geométricas de la vía y los vehículos, además estimadores relacionados con la interfase rueda-riel. Se conforman así dos grupos de matrices de datos.

El primero está constituido por los diferentes estimadores calculados a partir de la norma UIC-518 $W_{i,k}$, las propiedades de la vía ferroviaria $Y_{i,l}$ y los estimadores relacionados con la interfase rueda-riel $Z_{i,j}$ (para un total de 31 estimadores). Como observaciones de estos síntomas se considera una muestra de tramos rectos i . Por lo tanto, se cuenta con 17 matrices de este tipo, una por cada vehículo de pasajeros analizado.

$$O_{pr} = O_{16 \times 32} = \begin{bmatrix} \text{Estimadores} & \text{Estimadores} & \text{Estimadores} \\ \text{rueda - riel} & \text{UIC} & \text{vía} \\ \{Z_{i,j}\} & \{W_{i,k}\} & \{Y_{i,l}\} \end{bmatrix} \quad \begin{array}{l} i \approx 1,2, \dots, 16 \\ j = 1,2, \dots, 5 \\ k = 2,3,4,8,9,10,13, \dots, 18 \\ l = 1,3,4, \dots, 15 \end{array}$$

El segundo grupo está conformado de la misma manera que el anterior pero considerando una muestra de tramos curvos de la vía i , para un total de 35 estimadores. Igualmente se obtienen 17 matrices de este tipo.

$$O_{pr} = O_{37 \times 35} = \begin{bmatrix} \text{Estimadores} & \text{Estimadores} & \text{Estimadores} \\ \text{rueda - riel} & \text{UIC} & \text{vía} \\ \{Z_{i,j}\} & \{W_{i,k}\} & \{Y_{i,l}\} \end{bmatrix} \quad \begin{array}{l} i \approx 1,2, \dots, 37 \\ j = 1,2, \dots, 5 \\ k = 1,4,6,8,9,10,11,13, \dots, 20 \\ l = 1,2, \dots, 15 \end{array}$$

Para la contracción de las matrices antes mencionadas se cuenta con varias fuentes de información; parte de ésta fue suministrada por el personal de mantenimiento de la empresa y otra fue procesada a partir de mediciones experimentales realizadas en condiciones normales de operación del sistema.

3.2 Resultados del experimento

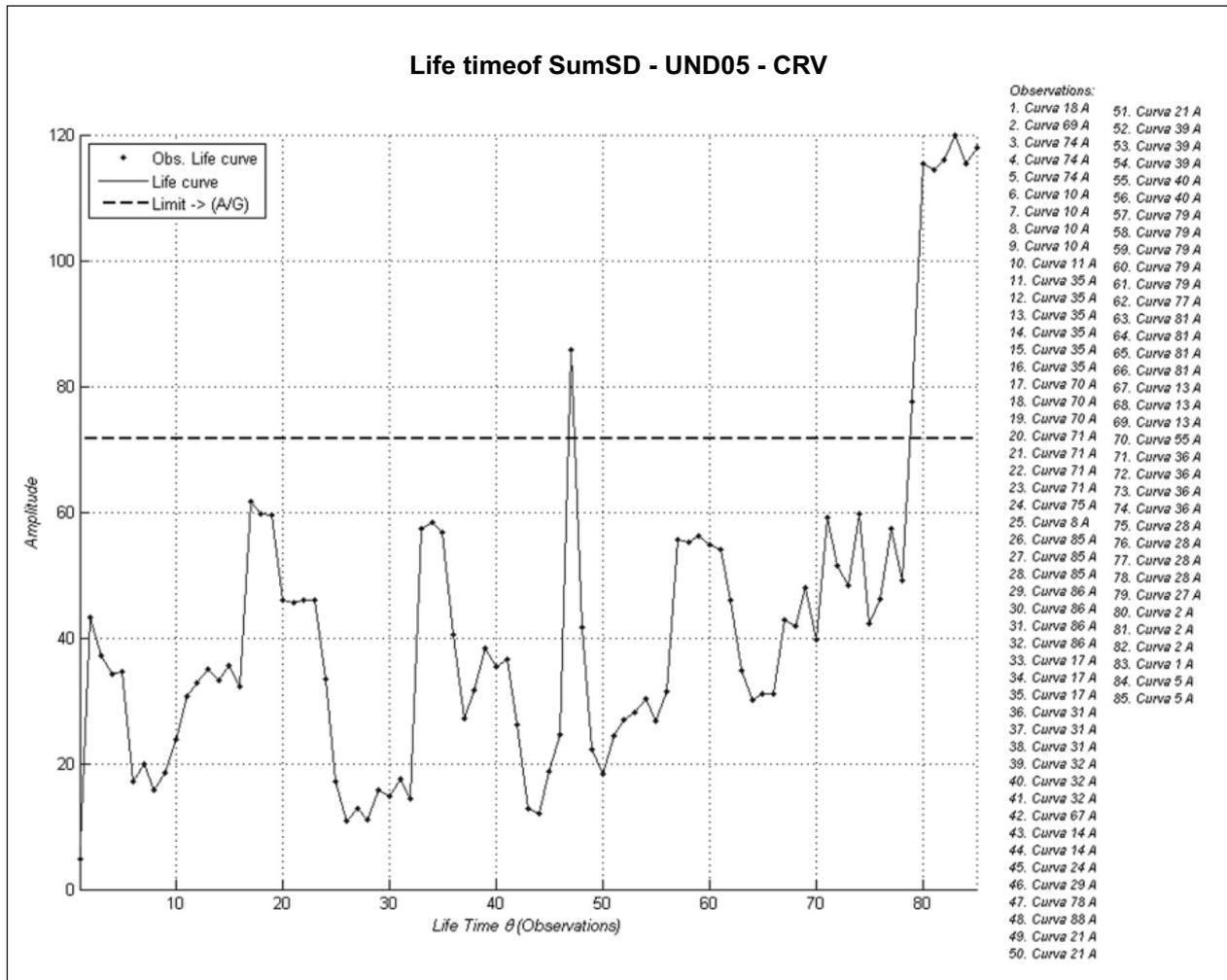
Cada una de las matrices conformadas se ingresan al monitoreo multidimensional de la condición MMC. Como primera medida éstas son transformadas teniendo en cuenta el valor medio y la desviación estándar de cada uno de los estimadores considerados, para luego ser ingresada en el módulo de reducción de dimensionalidad a través del análisis en componentes principales. Una vez establecidos los estimadores que menos aportan información sobre el estado técnico, se eliminan de la matriz original (sin transformar).

La matriz reducida es de nuevo transformada pero esta vez con respecto al valor inicial de cada

estimador y es ingresada al módulo de descomposición en valores singulares SVD, mediante el cual se determina el fallo generalizado, indicador del estado general del sistema técnico, se determina por el método de Neyman-Pearson su valor límite considerando una disponibilidad de $G = 0,9$ y un nivel de reparaciones innecesarias de $A = 0,1$.

Determinado el fallo generalizado y su correspondiente valor límite para cada uno de los grupos de matrices, se realiza el diagnóstico, se generan los indicadores de estado y se plantean sus modelos generales. Se presentan a continuación los resultados obtenidos para cada uno de los grupos de matrices conformadas.

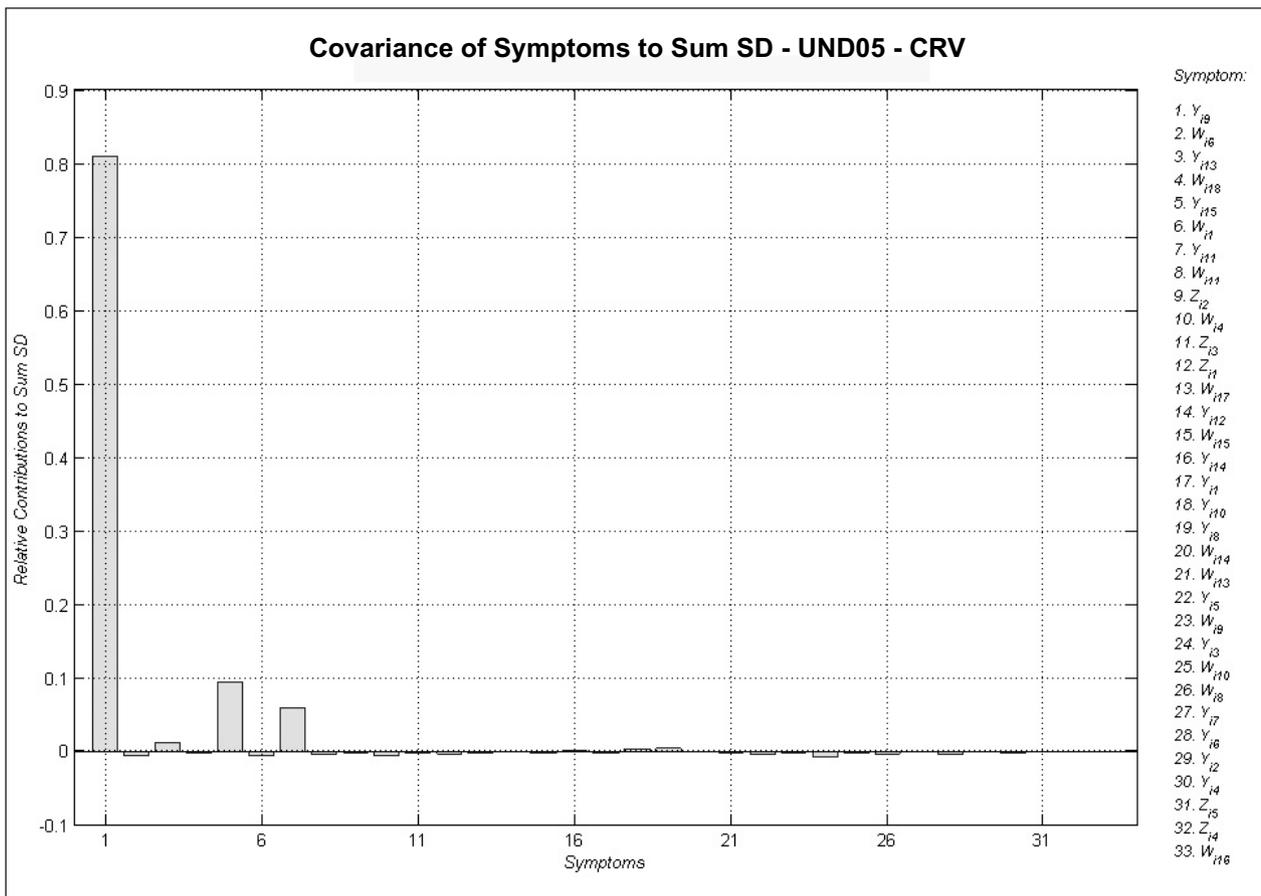
Figura 3. Perfil del fallo generalizado



La Figura 3 muestra el fallo generalizado alcanzado a partir de una matriz de observación, donde los síntomas son las diferentes variables medidas en la vía férrea, los estimadores obtenidos tras la aplicación del SPD y los calculados para la interfase rueda-riel; la observación de estos síntomas se realiza en el vehículo 05 transitando por diferentes tramos curvos de la vía.

El eje x representa las diferentes observaciones del fallo generalizado (tramos curvos) mientras que el eje y representa la amplitud del fallo; el diagnóstico se realiza entonces al determinar en qué tramo de la vía el fallo generalizado ha sobrepasado su valor límite, tramo en el cual se deberían realizar acciones de mantenimiento por parte de la empresa.

Figura 4. Covarianzas de los síntomas con el fallo generalizado



La Figura 4 presenta las covarianzas (eje y) entre el fallo generalizado y los diferentes síntomas considerados en el análisis (eje x). El o los síntomas que tengan una alta covarianza relativa entre los demás, se presume como el o los responsables del sobrepaso del fallo generalizado de su valor límite. Por tanto, una vez establecido el tramo de vía en el que se genera dicho sobrepaso, se identifica por las covarianzas el síntoma que ha generado esta condición; de esta manera, las acciones de

mantenimiento de la vía son enfocadas en unos tramos en particular y en un posible fenómeno que se está generando en dicho tramo.

3.3 Resultados para estimadores UIC, propiedades de la vía y estimadores de la interfase rueda-riel para tramos rectos

El mismo procedimiento descrito anteriormente es realizado para las 17 matrices en las que la

evolución de los síntomas está dada por los tramos rectos de la vía. En el 64,7 % de los casos (unidades analizadas) la variable que presenta mayor relevancia es la corrugación de la vía, un 11,8% se debe a la corrugación de la vía y a su alineación, un 11,8% se debe sólo a las alineaciones, un 5,9% se debe a la conicidad equivalente y un 5,9% a las fuerzas laterales.

En el 76,5 % de los casos la fiabilidad del sistema se ve disminuida en la recta ENV-86, en un 70,6 % para la recta 77-81; esto se debe al sobrepaso del fallo generalizado de su valor límite.

3.4 Resultados para estimadores UIC, propiedades de la vía y los estimadores de la interfase rueda-riel para tramos curvos

En el 41,2% de los casos (vehículos analizados) la variable que presenta mayor relevancia es la corrugación de la vía, un 17,6% se debe a la corrugación de la vía y la alineación horizontal, el 23,5% a las fuerzas laterales y el 17,6% a las aceleraciones cuasi-estáticas laterales. En el 76,5 % de los casos la fiabilidad del sistema se ve disminuida en la curva 2, en un 70,6 % para la curva 5.

3.5 Modelos de estado para el fallo generalizado

Una vez determinado el fallo generalizado y su relación con los síntomas medidos, se desarrolla un análisis de regresión múltiple considerando la matriz conformada por los estimadores de la norma UIC-518, las propiedades geométricas de la vía y los estimadores relacionados con la interfase rueda-riel, tanto para tramos rectos como curvos.

Se considera como variable dependiente el fallo generalizado que se encuentra tras la aplicación del SVD y como variables independientes los síntomas más representativos en cada caso (síntomas que tienen una alta participación en el fallo generalizado).

Se especifican los modelos particulares para cada uno de los 17 vehículos analizados, luego cada uno de estos modelos se aplica a los datos reales de los restantes 16 vehículos, esto con el fin de obtener un modelo general que se adapte a la mayoría de los casos.

El siguiente es el modelo general que se obtuvo para el fallo generalizado *SumSD* de los tramos rectos de la vía férrea:

$$\begin{aligned} SumSD = & 18,74 + 24,80Y_{i,9} + 14,28Y_{i,15} - 11,36Y_{i,14} - 7,91Y_{i,10} - 5,02W_{i,18} \\ & - 4,62Y_{i,8} + 3,09W_{i,2} + 3,00Y_{i,13} + 2,49Y_{i,12} - 1,26W_{i,17} - 0,97Y_{i,3} - 0,44Z_{i,1} - 0,20Y_{i,11} \end{aligned} \quad (5)$$

Este modelo se adapta con una significancia global aceptable a siete vehículos de los 17 considerados (se asume un nivel de significancia $\alpha = 0.05$). La Figura 5 muestra las tres mejores adaptaciones del modelo general.

El siguiente es el modelo general conseguido para el fallo generalizado *SumSD* de los tramos curvos de la vía férrea:

$$\begin{aligned} SumSD = & 44,13 + 27,07Y_{i,9} + 8,00Y_{i,15} + 7,78Y_{i,11} + 4,30Z_{i,2} + 1,80W_{i,} \\ & + 1,38Z_{i,1} + 0,32W_{i,4} - 0,31W_{i,1} - 0,13W_{i,6} + 0,06W_{i,18} \end{aligned} \quad (6)$$

Este modelo se adapta con una significancia global aceptable a ocho vehículo de los 17 considerados (se asume un nivel de significancia $\alpha = 0.05$). La Figura 6 muestra las tres mejores adaptaciones del modelo general.

Figura 5. Representación de las tres mejores adaptaciones del modelo general obtenido para tramos rectos

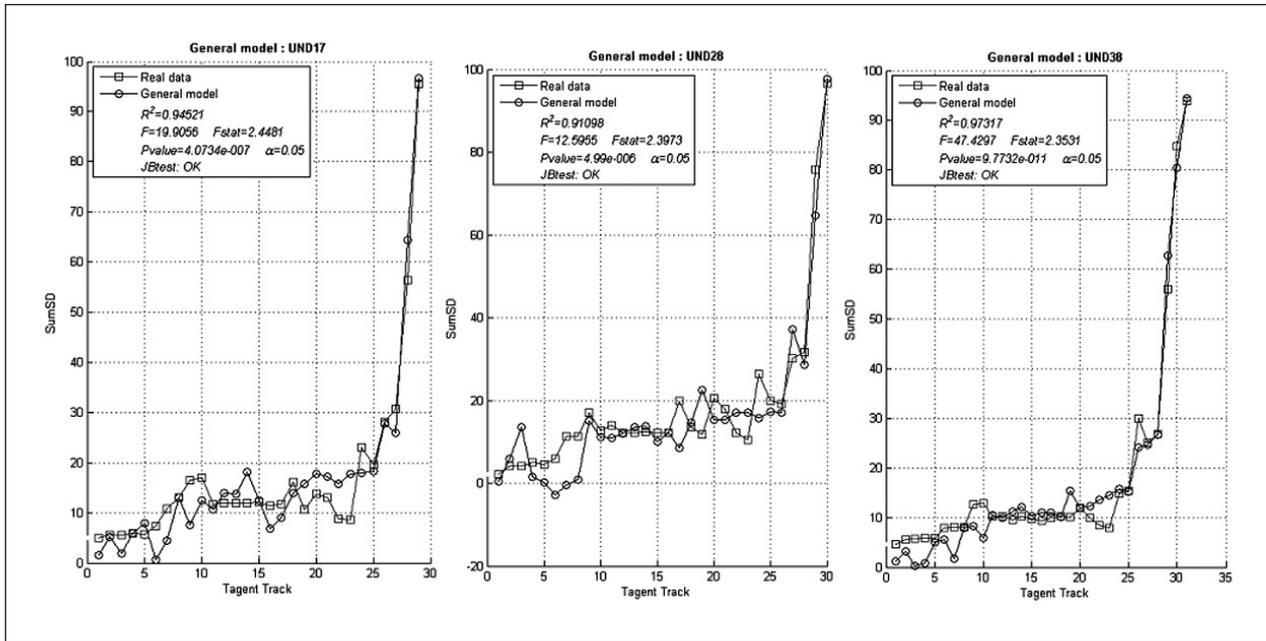
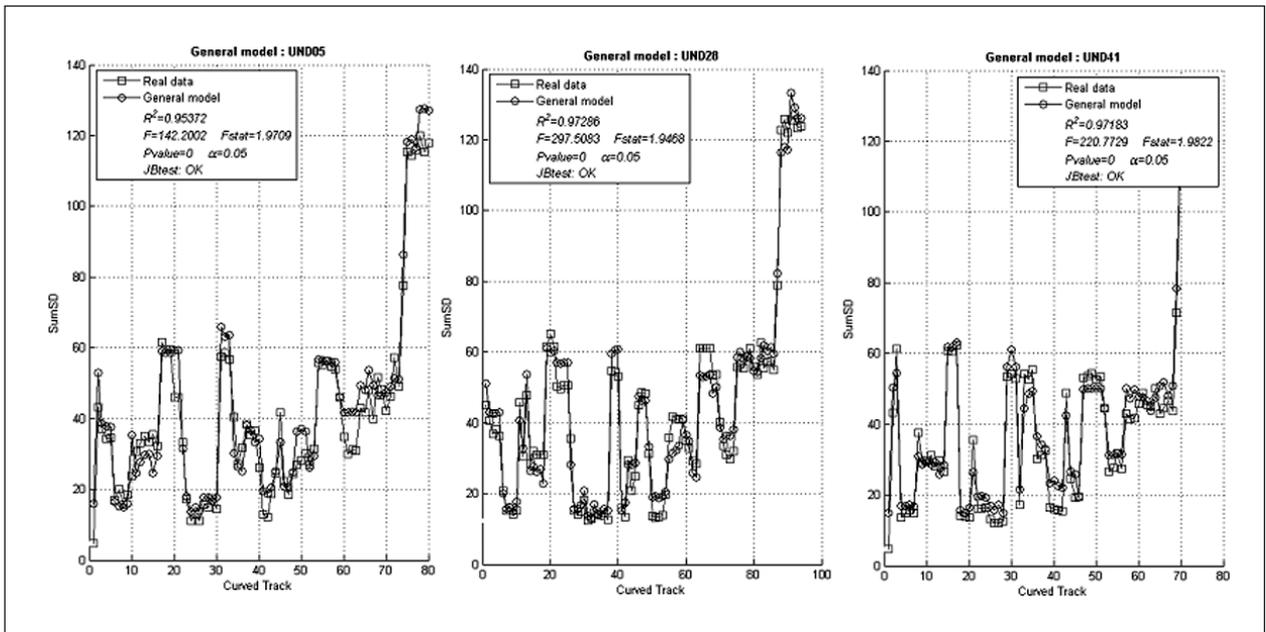


Figura 6. Representación de las tres mejores adaptaciones del modelo general obtenido para tramos curvos



La determinación de estos modelos pretende establecer la condición del fallo generalizado del sistema para condiciones actuales de los parámetros geométricos de la interfase vía-

vehículo, permitiendo realizar un diagnóstico rápido del sistema con el fin de enfocar las acciones de mantenimiento necesarias.



Conclusiones

Una aproximación holística de mantenimiento para un sistema técnico puede ser alcanzada mediante el uso del monitoreo multidimensional de la condición, esta metodología transforma información relevante sobre el estado técnico del sistema, en un único indicador denominado fallo generalizado, por medio del cual pueden realizarse tareas de diagnóstico y pronóstico; y generar indicadores de gestión del mantenimiento.

El monitoreo multidimensional de síntomas permite establecer los tramos de vía y los vehículos susceptibles de una revisión más exhaustiva por parte del personal de mantenimiento de vía permanente y movilización. Es posible, además, obtener pistas sobre el fenómeno que esté aconteciendo en el tramo a revisar. Por lo tanto este tipo de monitoreo, en el caso específico analizado, genera un apoyo en las decisiones de mantenimiento, lo que repercute en una disminución de los costos asociados a esta actividad y un óptimo uso del personal; también genera un aumento en la disponibilidad y fiabilidad del sistema.

El estudio se realizó en condiciones reales de explotación y se tuvieron en cuenta variables dinámicas de los vehículos, estimadores relacionados con la interfase rueda-riel y con los parámetros usualmente usados por el personal de mantenimiento de vía permanente y movilización, con el fin de conseguir información del estado técnico general del sistema.

La corrugación de los rieles se presenta como el principal factor que afecta la fiabilidad del sistema, tanto en tramos rectos como curvos, pues ésta tiene gran influencia sobre el fallo generalizado, el cual permite inferir sobre el estado técnico general o integral del sistema. Se sabe, además, que la corrugación de la vía genera vibraciones de las masas suspendidas del vehículo que son transmitidas a los pasajeros generando incomodidad (carencia de confort).

Otros factores que afectan notablemente son la fuerza lateral medida en los extremos de los ejes, fuerza que afecta la estabilidad y seguridad del vehículo cuando transita por tramos curvos, las alineaciones de la vía y las aceleraciones cuasi-estáticas laterales mediadas en la caja del vehículo (mide la afección al confort de los pasajeros).

Los tramos que generan una pérdida de la fiabilidad del sistema son: recta ENV-86, recta 77-81, recta 85-87, curva 2, curva 5, curva 4 y curva 1, por tanto podría sugerirse una modificación en las rutinas de mantenimiento con el fin de dar prioridad a dichos tramos.

Se establecieron dos modelos generales para la evaluación del fallo generalizado en tramos rectos y curvos, esto con el fin de hacer una rápida cuantificación del fallo en condiciones actuales de la vía y el vehículo, lo que permite apoyar las decisiones de mantenimiento.

Agradecimientos

Los autores manifiestan sus agradecimientos al Grupo de Estudios en Mantenimiento Industrial (GEMI) y muy especialmente a la Empresa Metro de Medellín Ltda., a Colciencias y la Universidad EAFIT, por el apoyo a este trabajo y haber permitido la publicación de los resultados y demás información producto de la investigación.

Bibliografía

Bongers, Daniel R. 2004. *Development of a classification scheme for fault detection in long wall systems*. Major thesis submitted for the degree of doctor of philosophy, Department of mechanical engineering. Brisbane, Australia: University of Queensland.

Cempel, Czeslaw. 1999. "Innovative Developments in Systems Condition Monitoring". En: *Key Engineering Materials*, vol. 167-168. Poznan, Poland: Poznan University of Technology, pp. 172-188.

_____. 2000a. *Fault oriented decomposition of symptom observation matrix for systems condition monitoring*. Hannover, Alemania: Hannover University.

_____. 2000b. *Signals, symptoms, faults. Condition oriented multi dimensional monitoring of systems in operation*. Poznan, Polonia: Poznan University of technology.

_____. 2003a. *Multi dimensional condition monitoring of mechanical systems in operation. Mechanical systems and signals processing*. Poznan, Polonia: Poznan University of technology.

_____. 2003b. "Multi fault condition monitoring of mechanical system in operation". In: *XVII IMEKO world congress*. Dubrovnik, Croacia, pp. 1-4.

_____. 2004. "Implementing multidimensional inference capability in vibration condition monitoring". In: *Surveillance 5 CETIM*, Senlis 11-13 october.

Cempel, Czeslaw & Franciszek Tomaszewski. 1992. *Diagnostyka maszyn : zasady ogólne – przykłady zastosowań*, Międzyresortowe centrum naukowe *eksploatacji majątku trwałego*: Radom.

_____. 2003. "Extraction methods of multi-fault information in machine condition monitoring", *Key engineering materials*, vol. 245 – 246, Poznan, Poland. pp. 215 – 221.

_____. 2005. "Multidimensional vibration condition monitoring of non-stationary mechanical systems in operation". In: *Twelfth International Congress on Sound and Vibration*, Lisbon, 11-14 July.

_____. 2006. "Averaging the symptoms in multidimensional condition monitoring for machines in non-stationary operation", *Thirteenth International Congress on Sound and Vibration*. Vienna, Austria, July 2-6.

Natke, Hans. G. & Cempel, Czeslaw. 2001. *The symptom observation matrix for monitoring and diagnostics*. In: *Journal of Sound and Vibration*. London : Elsevier.

Wall, Michael E; Rechtsteiner, Andreas & Rocha, Luis M. 2003. "Singular value decomposition and principal component analysis". In: D. P. Berrar, W. Dubitzky & M. Granzow Eds. *A practical approach to microarray data analysis*. Kluwer: Norwel.

International Union of Railways. 2003. "UIC-518 Testing and approval of railways vehicles from the point of view of their dynamic behaviour, safety, track fatigue and ride quality". Paris : UIC.