

Monitorización del Confort Vibroacústico en Ascensores mediante Técnicas de Tratamiento de Señal Avanzadas

E. Esteban Echeverría⁽¹⁾, O. Salgado Picón⁽¹⁾, A. Iturrospe Iregui⁽²⁾, I. Isasa Gabilondo⁽³⁾

(1) Dpto. de Ingeniería Mecánica. IK4-Ikerlan, J.M. Arizmendiarrreta 2, 20500 Mondragón, España
osalgado@ikerlan.es

(2) Dpto. de Electrónica e Informática. Escuela Politécnica Superior de Mondragon Unibertsitatea,
Loramendi 4, 20500 Mondragón, España

(3) Dpto. de Especialidad Mecánica, Orona EIC S. Coop., Pol. Lastaola s/n, 20120 Hernani, España

En este artículo se analizan las técnicas de tratamiento de señal que actualmente se emplean en la monitorización de ascensores, identificando sus capacidades y limitaciones. Además, se propone el empleo de otras técnicas de tratamiento de señal, que se han empleado con éxito en otras aplicaciones y que presentan potencial para mejorar la monitorización en ascensores. Finalmente, se presentan resultados de simulación en base a un modelo teórico simplificado de un tipo de ascensor y empleando un filtro de Kalman extendido (EKF), el cual se utiliza para la detección de fallos en sistemas electromecánicos, y en este caso ha sido aplicado para monitorizar la masa y vibración en cabina.

1. INTRODUCCIÓN

El mantenimiento preventivo consiste en la realización de revisiones periódicas de una instalación de ascensor [1]. El mantenimiento correctivo se fundamenta en la reparación de un ascensor que ya está deteriorado. Ambos servicios de mantenimiento suponen un elevado coste para las empresas que ofrecen este servicio. Ligeras mejoras en la eficiencia de estos servicios pueden suponer un ahorro económico [2]. Además, una correcta conservación de la instalación incide positivamente en la calidad y el confort tanto del viajero como de los usuarios de los recintos adyacentes a la instalación [3-4].

El confort en el transporte vertical depende de varias variables como la vibración durante el viaje y el nivel de ruido acústico transmitido por vía estructural (ruido generado por las vibraciones de la estructura mecánica) o vía aérea. El confort está relacionado con la percepción de la calidad de la instalación [5-6] por parte de los usuarios de la misma. Existen procesos estandarizados que tratan de evaluar el estado de la instalación en función de la vibración y el ruido acústico. Por un lado, la ISO 18738:2003 [7] establece cómo medir y procesar las señales de vibración y ruido acústico en cabina mientras que la VDI 2566 en sus dos partes [8-9], recomienda los niveles de presión sonora aceptables en el hueco del ascensor y en los recintos adyacentes a la instalación. La VDI 2566 también facilita indicaciones para el aislamiento del ruido. Estos estándares se limitan a recomendar los posibles indicadores para medir y evaluar las señales de ruido acústico y vibraciones en una instalación de ascensor.

Las vibraciones y el ruido producidos por una instalación de ascensor no dependen únicamente de su diseño inicial, sino que pueden verse amplificados por fallos y deterioro durante la vida útil de la instalación. La degradación del confort puede ser además un indicador para anticiparse a la detección de los fallos y defectos en las instalaciones que requieran un mantenimiento. La capacidad de monitorizar de forma continua una instalación e identificar las causas que inciden en los niveles de ruido y vibración se plantea como una necesidad actual en el sector del transporte vertical [10-12]. Sin embargo, existen

escasas publicaciones entorno a la monitorización de ascensores en comparación a otras aplicaciones.

El resto del documento se divide en cinco apartados. En la sección 2 se resumen los principales componentes de un ascensor eléctrico, el funcionamiento básico y la dinámica. En el apartado 3 se revisan los métodos de monitorización empleados en ascensores analizando sus limitaciones, además de métodos de monitorización aplicados en otros sistemas electromecánicos. En la sección 4 se realiza una simulación de un modelo de ascensor aplicando un filtro de Kalman extendido comúnmente aplicada en monitorización. Finalmente se presentan las conclusiones del artículo y líneas futuras sobre las posibles técnicas de monitorización a emplear en una instalación de ascensor.

2. ASCENSOR ELÉCTRICO

Según se muestran en la Figura 1, los componentes principales de un ascensor eléctrico se pueden agrupar en cinco grupos principales: máquina, conjunto viajero, contrapeso, sistema de suspensión y guiado. Estos grupos se describen a continuación.

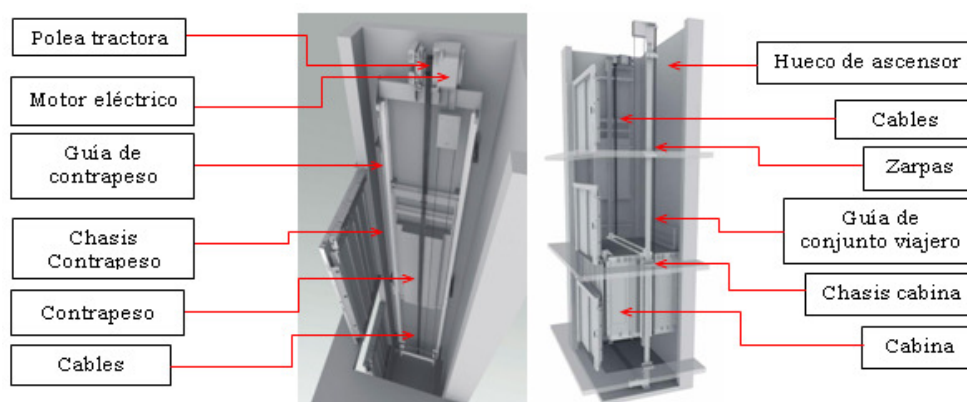


Figura 1. Ascensor eléctrico residencial (Cortesía de Orona S. Coop. ©)

La máquina es el grupo electromecánico que regula el movimiento vertical del sistema de ascensor. En este grupo se encuentran entre otros componentes el motor eléctrico, la polea tractora y el regulador.

El conjunto viajero es el elemento mecánico compuesto por el chasis y la cabina. El chasis es la estructura metálica unida a la cabina que soporta los esfuerzos verticales procedentes del sistema de suspensión, las fuerzas laterales procedentes del conjunto de guiado y los esfuerzos eventuales provocados por los elementos de seguridad. La cabina es el habitáculo transportado por el chasis donde se encuentran los pasajeros.

El contrapeso es el conjunto mecánico compuesto por un chasis que contiene masas de hormigón o plomo. El contrapeso, además de su tara, equilibra un porcentaje fijo de la carga nominal del conjunto viajero. El objetivo del contrapeso es reducir el par necesario del motor para mover el conjunto viajero.

El sistema de suspensión está compuesto por cables y poleas que sustentan el conjunto viajero y el contrapeso. Dependiendo del tipo de instalación existen diversas configuraciones cinemáticas [13].

El guiado está compuesto por un par de guías tanto en el conjunto viajero como en el contrapeso. Las guías se unen al hueco del ascensor mediante elementos llamados zarpas. El guiado dirige el movimiento del conjunto viajero y el contrapeso verticalmente minimizando los desplazamientos laterales.

La máquina ejerce un par que genera un movimiento lineal de cabina y contrapeso por medio del sistema de suspensión.

En la Figura 2 se ilustra un perfil típico de velocidad de la cabina durante el viaje. El perfil de velocidad consta de una región de aceleración inicial, una zona de velocidad constante y un área de deceleración.

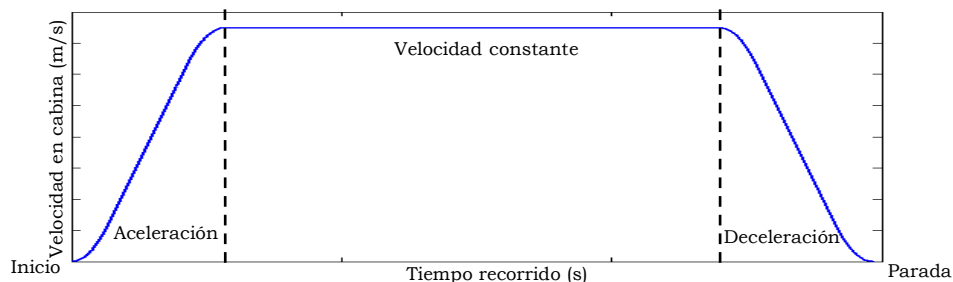


Figura 2. Perfil típico de velocidad de la cabina durante el viaje.

De este modo, la forma del propio perfil además de la evidente variación en las longitudes de los cables en ambos lados (conjunto viajero y contrapeso) durante el recorrido [14] provoca que la dinámica del ascensor sea variante en el tiempo.

3. MONITORIZACIÓN EN ASCENSORES

La monitorización permite la observación mediante dispositivos o instrumentación electrónica del curso de una o varias características para la detección de posibles irregularidades en un sistema electromecánico. Un sistema de monitorización persigue evaluar el estado y estimar el posible deterioro de un sistema electromecánico [15]. Los sistemas de monitorización constan generalmente de dos etapas: una primera etapa en la que se extraen las características relevantes de las señales medidas y una segunda etapa en la que se diagnostica el estado del sistema electromecánico en base a las características extraídas.

1. Extracción de características

La ISO 18738:2003 establece el uso de características en el dominio temporal obtenidas a partir de las series temporales de las señales de aceleración y ruido acústico de cabina. Sin embargo, la ISO 18738:2003 no relaciona las características extraídas con las causas que inciden en el estado del sistema.

Diversos equipos comerciales tales como los denominados EVA-625 © [16] y el Lift PC © [17] procesan la señales según la normativa ISO 18738:2003. Adicionalmente, algunos de estos dispositivos realizan un procesamiento de la señal basado en estimaciones espectrales. Las técnicas de estimación espectral empleadas por estos dispositivos asumen la hipótesis de estacionariedad de las señales.

Sin embargo, el análisis espectral tampoco permite por sí sólo relacionar las componentes espectrales con el estado o deterioro del sistema. Diversas publicaciones [3,18] proponen utilizar las corrientes procedentes del motor como alternativa a la señales de vibración, empleando la técnica conocida “Motor Current Signature Analysis” (MCSA) [19], la cual se centra en el análisis espectral de las corrientes del estator para detectar defectos mecánicos y eléctricos [18].

Para analizar señales en las que la distribución espectral de potencia cambia en el tiempo, en la literatura científica se hallan otras técnicas de tratamiento de señal más adecuadas. Las técnicas basadas en el análisis tiempo-frecuencia, entre las que se destacan la transformada corta de Fourier (en inglés Short Time Fourier Transform, “STFT”), ondículas (“Wavelets”) y la distribución de Wigner Ville, sirven para analizar señales cuyas componentes frecuenciales varían en el tiempo [15]. Estas técnicas se han empleado en la monitorización de defectos en sistemas con rodamientos, cajas de cambio e incluso en motores de ascensores [20-22]. En estas técnicas existe un límite entre la resolución frecuencial y la resolución temporal [23]. De estas tres técnicas cabría destacar como las ondículas optimizan la resolución tanto temporal como frecuencial analizando las

frecuencias altas mediante cortos intervalos de tiempo y las frecuencias bajas mediante largos intervalos de tiempo.

Otras técnicas de estimación espectral se basan en modelos paramétricos [24], los cuales comúnmente vuelven a partir de la hipótesis de que las señales analizadas son estacionarias. Sin embargo, en la literatura se han adaptado estos algoritmos para analizar señales no estacionarias [25]. Suponen que las señales son cuasi-estacionarias en el tiempo y por lo tanto se han aplicado para analizar sistemas que varían lentamente en el tiempo. Éstas se han propuesto en monitorizado de estructuras civiles [25] y también para detectar defectos en ascensores [26]. En el caso de que las señales sean cicloestacionarias existen técnicas para resaltar la información que quedaría oculta en el espectro. En la publicación [27] han adaptado este tipo de técnicas para la monitorización y detección de fallos en sistemas electromecánicos que contienen motores o máquinas rotativas.

2. Diagnóstico del estado del sistema

Los diferentes tipos de aproximaciones a la hora de abordar el desarrollo de sistemas de monitorizado, se han clasificado en la literatura en tres tipos [28]:

Aproximaciones basadas en caja negra (“Black Box”). En este tipo de técnicas no se dispone de un modelo previo que describa el comportamiento del sistema monitorizado, por lo que generalmente se basan en algoritmos de clasificación estadísticos [29]. En estas técnicas es necesario emplear un conjunto de datos de medidas experimentales suficiente para poder entrenar el clasificador. Los problemas de sobrentrenamiento o falta de entrenamiento juegan un papel importante a la hora de obtener resultados satisfactorios en monitorizado. Un ejemplo de técnica empleada comúnmente en aproximaciones basadas en caja negra son las denominadas redes neuronales artificiales (en inglés Artificial Neural Network, “ANN”) [12].

Aproximaciones basadas en caja gris (“Grey Box”). Este tipo de aproximación combina el modelado teórico del sistema a monitorizar con el aprendizaje continuo mediante señales captadas durante el funcionamiento del sistema monitorizado. Se trata de modelos cualitativos que tratan de identificar y predecir el comportamiento del sistema monitorizado. Generalmente se basan en reglas *si / entonces* evaluadas por un sistema experto empleando información medida sobre el estado real del sistema y lógica difusa [30-32]. La lógica difusa (en inglés “Fuzzy Logic”) es una extensión de la lógica booleana (0-1) que permite reconocer estados intermedios entre 0 (falso) y 1 (verdadero) [33]. El principal inconveniente de la lógica difusa es la interpretación de los estados difusos que determinan el estado del sistema [34].

Aproximaciones basadas en caja blanca (“White Box”). Estas técnicas requieren disponer de un modelo teórico que describa el comportamiento del sistema [28]. Algunas de las técnicas más utilizadas en aproximaciones “White Box” se basan en filtros adaptativos y observadores, que permiten estimar parámetros de interés del sistema de monitorizado [35]. Los algoritmos de filtros adaptativos son comúnmente utilizados en sistemas variantes en el tiempo [36]. Los observadores de Luenberger se emplean en sistemas con señales deterministas. Los filtros de Kalman son más adecuados cuando existen ruidos aleatorios [37]. Concretamente, el filtro de Kalman permite estimar sistemas dinámicos representados en espacio de estados. Combina la información medida y el conocimiento previo acerca del comportamiento del sistema para estimar los parámetros del sistema. En la industria de la elevación, se han propuesto este tipo de técnicas para reducir las vibraciones procedentes en la cabina mediante control [38]. Además, son técnicas comúnmente empleadas en la detección de fallos (Fault Detection and Identification, FDI) en sistemas electromecánicos [37].

4. SIMULACIÓN Y RESULTADOS

El ejemplo que se muestra a continuación analiza los fenómenos vibratorios que se producen en un ascensor. Dichas vibraciones se pueden transmitir al edificio mediante vibración estructural como causa generante de ruido. El objetivo de las simulaciones

realizadas es estimar la vibración de la cabina y la masa de la misma, teniendo en cuenta únicamente vibraciones medidas en la polea tractora. En diversas aplicaciones, como el caso del ascensor, suele ser conveniente estimar parámetros difíciles de medir, o cuya medición no es viable debido a los inconvenientes que conlleva.

Según se muestra en la Figura 3, se parte de un modelo matemático de la dinámica vertical del ascensor, adaptado y simplificado a partir de la referencia [39]. El modelo consta de tres cuerpos principales: polea (X_m), cabina (X_c) y contrapeso (X_{cw}) cuyos parámetros concentrados se describen en la Tabla 1. Cabe destacar que la rigidez de los cables de cabina y contrapeso son variables en función de la longitud del cable en cada instante.

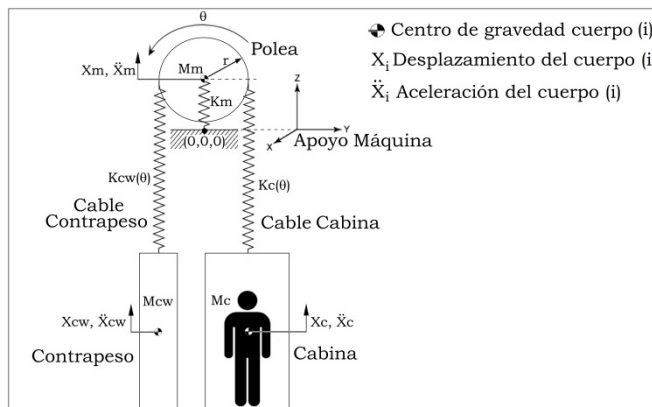


Figura 3. Modelo de dinámica vertical de un ascensor simplificado

El modelo representa un sistema dinámico variante en el tiempo y compuesto por tres grados de libertad con las ecuaciones dinámicas (1).

$$\begin{aligned}
 M_m \ddot{x}_m + K_m x_m + K_c (x_m - x_c + \theta r) + K_{cw} (x_m - x_{cw} - \theta r) &= 0 \\
 M_{cw} \ddot{x}_{cw} + K_{cw} (x_{cw} - x_m + \theta r) &= 0 \\
 M_c \ddot{x}_c + K_c (x_c - x_m - \theta r) &= 0
 \end{aligned} \tag{1}$$

Descripción	Relación con otras variables	Valor numérico
θ (consigna – giro de la polea)	-	(variable)
r (radio de la polea)	-	0.2 m
M_m (masa conjunto motor)	-	210 kg
K_m (rigidez apoyo motor)	-	$7,989 \cdot 10^6$ N/m ²
M_c (masa cabina)	$M_c = 1000 + 80 \cdot (n_pj)$	1000 a 1400 kg
K_c (rigidez cable cabina)	$K_c = 0,7 \cdot 210 \cdot 10^9 \cdot A / (20 - \theta \cdot r)$	(variable)
M_{cw} (masa contrapeso)	-	1320 kg
K_{cw} (rigidez cable contrapeso)	$K_{cw} = 0,7 \cdot 210 \cdot 10^9 \cdot A / (2 + \theta \cdot r)$	(variable)
A (área transversal del cable)	-	33,18 mm ²
n_pj (número de personas)	-	0 a 5
T_s (Periodo de muestreo)	$1/F_s$	0.001s

Tabla 1. Parámetros de la simulación

Con el fin de proporcionar una monitorización de la vibración en cabina y estimar los parámetros requeridos en un sistema variante en el tiempo de múltiples grados de libertad, se ha empleado el algoritmo extendido de Kalman (en inglés Extended Kalman Filter, “EKF”) de acuerdo al procedimiento descrito en la referencia [36]. Para el sistema descrito por las ecuaciones dinámicas (1), se presentan a continuación la matriz jacobiana discreta y el vector de entrada discreto, ver ecuación (2).

Para inicializar el algoritmo EKF se establecen las condiciones iniciales del vector de las variables de estado en $x(0) = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1000]^T$, la matriz de covarianza del ruido del sistema

en $Q(0) = \text{diag}(0 \ 0 \ 10^{-3} \ 10^{-3} \ 10^{-3} \ 10^{-3} \ 10^6)_{7 \times 7}$, la matriz de covarianzas en $P(0) = 100 \cdot I_{7 \times 7}$ y el vector de covarianza de ruido de las medidas en $r(0) = \mathbf{0}$. La simulación se ha realizado en el entorno Simulink © (ver

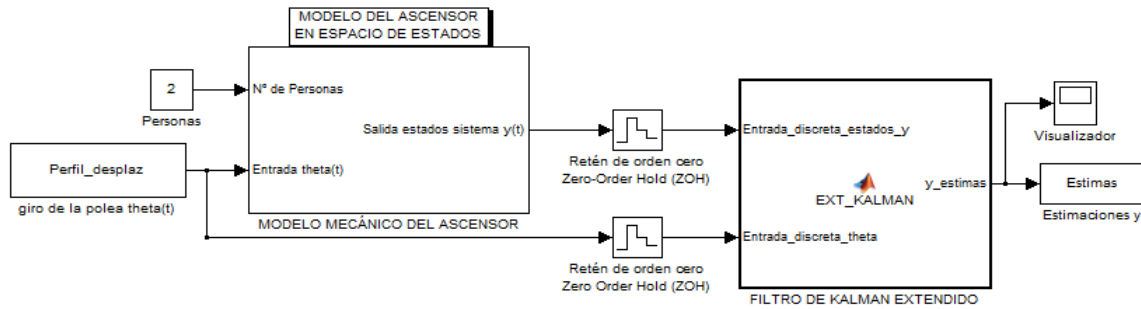


Figura 4).

$$F[k-1] = \frac{\partial F(x[k-1])}{\partial x[k-1]} = \begin{bmatrix} 1 & T_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{T_s(-K_m - K_{cw} - K_c)}{M_m} & 1 & \frac{T_s(K_{cw})}{M_m} & 0 & \frac{T_s(K_c)}{M_m} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & T_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{T_s(K_{cw})}{M_{cw}} & 0 & -\frac{T_s(K_{cw})}{M_{cw}} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & T_s & 0 & 0 \\ \frac{T_s(K_c)}{M_c} & 0 & 0 & 0 & -\frac{T_s(K_c)}{M_c} & 1 & -\frac{T_s(K_c)}{M_c^2} x_1[k-1] + \frac{T_s(K_c)}{M_c^2} x_3[k-1] & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}; \quad u[k-1] = \begin{bmatrix} 0 \\ T_s \frac{r}{M_m} (K_{cw} - K_c) \\ 0 \\ -T_s \frac{r}{M_{cw}} (K_{cw}) \\ 0 \\ T_s \frac{r}{M_c} (K_c) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

El modelo de Simulink © consta de dos bloques principales: el primer bloque es el modelo mecánico del ascensor de la ecuación (1) representado en espacio de estados cuyas entradas son el número de personas y el giro de la polea (θ). El bloque del filtro EKF se ha desarrollado a partir de la ecuación (2) y en este bloque se introducen el giro de la polea (θ) y los estados del modelo dinámico previamente discretizados mediante el reten de orden cero (en inglés “ZOH”). En este caso, la salida del filtro EKF son las estimaciones de los parámetros deseados. Los parámetros de simulación utilizados se resumen en la Tabla 1 anterior.

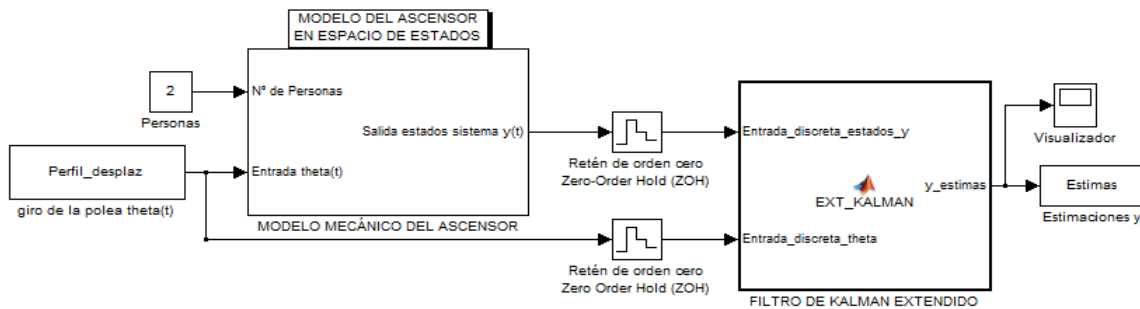


Figura 4. Modelo de Simulación en el entorno Simulink ©

En la Figura 5, se muestran los resultados obtenidos al estimar la aceleración de la cabina y la masa de la cabina. Se observa que el algoritmo EKF es capaz de estimar las vibraciones de la cabina en base a medidas de aceleración realizadas en la polea tractora, incluso cuando la dinámica del sistema cambia al variar la longitud de los cables. Por otro lado, se aprecia que el algoritmo EKF es también capaz de estimar la masa de la cabina.

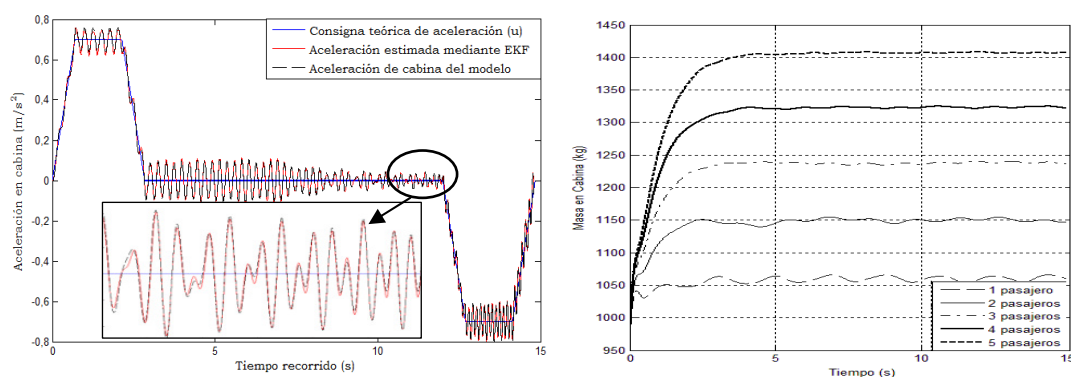


Figura 5. (izda.) Resultados de la estimación de la aceleración de cabina mediante el EKF; (dcha.) Resultados de la estimación de la masa de cabina mediante el EKF

5. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

En general, las técnicas de estimación espectral que se utilizan actualmente en la monitorización del ascensor parten de la hipótesis de que las señales analizadas son estacionarias. Sin embargo, el ascensor es un sistema variante en el tiempo, por lo que la densidad espectral de potencia de las señales medidas suele variar a lo largo del viaje. Para analizar señales cuyas componentes frecuenciales cambian en el tiempo existen otras técnicas más apropiadas, tales como las técnicas de análisis tiempo-frecuencia, tiempo-escala o los filtros adaptativos empleados en la identificación de sistemas. En el caso de que las señales presenten características cicloestacionarias se pueden emplear técnicas específicas que optimicen la información extraída de las señales. Finalmente, el artículo recoge publicaciones en las que se adaptan algoritmos de estimación espectral para analizar señales cuasi-estacionarias.

Como una primera aproximación, se ha empleado el algoritmo EKF para estimar las vibraciones de la cabina y la masa de la misma, en base a un modelo simplificado del ascensor. El algoritmo EKF requiere conocer las ecuaciones dinámicas del sistema (aproximación de caja blanca). Si el comportamiento del sistema es difícil de modelar, puede ser más conveniente emplear técnicas que complementen el conocimiento que se tiene a priori de su dinámica con el aprendizaje basado en medidas experimentales (aproximación de caja gris).

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] L. Rivet, *Improving Safety and Accessibility of Existing Lifts in Europe*, Version 1, SNEL (2004).
- [2] T. Ebeling, *Optimizing maintenance - cost reduction by adopting intelligent lift system sensors*. Elevcon, USA, (2012).
- [3] A. Q. Flores, J. B. Carvalho, y A. J. M. Cardoso, *Mechanical fault detection in an elevator by remote monitoring*, XVIII International Conference on Electrical Machines, ICEM'08, Vila Moura, Portugal, (2008).
- [4] S. T. Park y B. S. Yang, *An implementation of risk-based inspection for elevator maintenance*, Journal of mechanical science and technology, 24(12) (2010), 2367-2376.
- [5] G. P. Lorsbach. *Analysis of elevator ride quality, vibration*, Elevator World Inc, 51 (2003), 108-113.
- [6] D. Mehr. *Lift ride quality measurement*, Elevatori tecnica, (2004), 34-47.
- [7] International Standard ISO 18738:2003, *Lifts (elevators) - measurement of lift ride quality*, (2003).
- [8] VDI 2566-1:2011, *Acoustical desing for lifts with a machine room*, (2011).
- [9] VDI 2566-2:2004, *Acoustical desing for lifts without machine room*, (2004).
- [10] T. Ebeling. *Condition Monitoring for Elevators - An Overview*. Lift Report, 6 (2011), 25-26.

- [11] A. Q. Flores, J. B. Carvalho, y A. J. M. Cardoso, *The induction motor as a mechanical fault sensor in elevator system*, (2009).
- [12] H. Wuming, W. Peiliang y Y. Qiangguo, *Fault Diagnosis of Traction Machine for Lifts Based on Wavelet Packet Algorithm and RBF Neural Network*, International Conference on Computational and Information Sciences (ICCIS), (2010).
- [13] J. P. Andrew y S. T. Kaczmarczyk, *Systems Engineering of Elevators*, Elevator World Inc., (2011).
- [14] S. Kaczmarczyk y R. Iwankiewicz, *Dynamic response of an elevator car due to stochastic rail excitation*, Estonian academy of sciences physics mathematics, (2006).
- [15] R. Randall, *Vibration-based Condition Monitoring: Industrial, Aerospace and Automotive Applications*, John Wiley & Sons, (2010).
- [16] *Eva-625 elevator vibration analysis system*, Technical report, PMT Europe, (2010).
- [17] P. Pini y B. Eng. *Modules for safe and sure operation, monitoring and documentation in elevators*, Lift Report, 2 (2005), 30–40.
- [18] J. Royo, R. Segui, A. Pardina, S. Nevot y F. J. Arcega, *Machine current signature analysis as a way for fault detection in permanent magnet motors in elevators*, International Conference on Electrical Machines, ICEM, (2008).
- [19] N. Mehala, *Condition Monitoring and Fault diagnosis of induction motor using motor current signature analysis*. Tesis Doctoral, University of Kurukshetra, India, (2010).
- [20] P. Arpaia, E. De Matteis, G. Montenero y C. Manna, *Evolutionary design of lifting scheme wavelet-packet adaptive filters for elevator fault detection*, Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 2010.
- [21] J. Zhang, Z. Feng, Z. Qin y F. Chu, *Gearbox Fault Diagnosis Using Time-Wavelet Energy Spectral Analysis*, The second international conference of Condition Monitoring of Machinery in Non-Stationary Operations, Hammamet, Tunes, (2012).
- [22] M. Coconcelli, R. Zimroz, R. Rubini y W. Bartelmus, *STFT based approach for ball bearing fault detection in a varying speed motor*, The second international conference of Condition Monitoring of Machinery in Non-Stationary Operations, Hammamet, Tunes, (2012).
- [23] D. Gabor. *Theory of communication. Part 1: The analysis of information*, Journal of the Institution of Electrical Engineers-Part III: Radio and Communication Engineering, 93(26) (1946), 429-441.
- [24] J. G. Proakis y D. G. Manolakis, *Digital signal processing 3th edition*. Prentice Hall, (1996).
- [25] S. D. Fassois y M. D. Spiridonakos, *Non-Stationary Random Vibration Modelling and Identification: an overview of parametric methods and applications*, 4th International Operational Modal Analysis Conference (IOMAC), Estambul, Turquia, (2011).
- [26] J. Y. Yi y Y. J. Huang. *Fault Diagnosis of Elevator Based AR Bi-Spectrum*. Advanced Materials Research, 468-471 (2012), 1743-1748.
- [27] J. Antoni, F. Bonnardot, A. Raad y M. El Badaoui. *Cyclostationary modelling of rotating machine vibration signals*, Mechanical systems and signal processing, 18:(6) (2004), 1285-1314.
- [28] R. Isermann y M. Munchhof, *Identification of Dynamical Systems: An Introduction with Applications*, Springer Verlag, (2011).
- [29] X. Z. Gao, S. J. Ovaska. *Soft computing methods in motor fault diagnosis*, Applied Soft Computing. 1:(1) (2001), 73-81.
- [30] V. Venkatasubramanian, R. Rengaswamy, K. Yin y S. N. Kavuri. *A review of process fault detection and diagnosis. Part I: Quantitative model-based methods*, Computers and Chemical Engineering, 27 (2003), 293-311.
- [31] V. Venkatasubramanian, R. Rengaswamy y S. N. Kavuri. *A review of process fault detection and diagnosis. Part II: Qualitative models and search strategies*, Computers and Chemical Engineering, 27 (2003), 313-326.
- [32] V. Venkatasubramanian, R. Rengaswamy, S. N. Kavuri y K. Yin. *A review of process fault detection and diagnosis. Part III: Process history based methods*, Computers and Chemical Engineering, 27 (2003), 327-346.
- [33] M. Hellman. *Fuzzy logic introduction*. Universite de Rennes, (2001).

- [34] A. Padak, *Developing a software to determine the microcontroller specifications for fuzzy logic control applications*, Tesis de Master, University of Çukurova, Turquía, (2006).
- [35] S. Da Silva, C. Gianini y V. Lopes. *Adaptive filter feature identification for structural health monitoring in an aeronautical panel*. Structural Health Monitoring, (2011), 481-489.
- [36] H. Cao, *Parameter Estimation Using Extended Kalman Filter for the Swash Plate Assembly and the Control Piston in a Load Sensing Pump*, Tesis Doctoral, University of Saskatchewan, Canada, (2000).
- [37] G. Heredia, A. Ollero y J. Royo, *Sensor fault detection in small autonomous helicopters using observer/Kalman filter identification*, International Conference on Mechatronics, ICM, Málaga, España, (2009).
- [38] J. K. Kang y S. K. Sul. *Application of nonlinear observers for elevator vibration control*, Industry Applications, (1997), 873-879.
- [39] Y. Q. Zhou, *Models for an elevator hoistway vertical dynamic system*, Fifth international congress on sound and vibration, Adelaida, Australia, (1997).