

03-043

### **APPLICABILITY OF MARKOV CHAINS IN THE COST MANAGEMENT OF ELECTRO-MEDICAL EQUIPMENT.**

González Domínguez, Jaime <sup>(2)</sup>; García Sanz-Calcedo, Justo <sup>(2)</sup>  
<sup>(1)</sup> Universidad de Extremadura, <sup>(2)</sup> Universidad De Extremadura

Markov chains is a probabilistic model often used to simulate behaviors that comply with the Markovian property that the future state event depends only on the present event and not on the past. Electromedical equipment is essential to ensure efficient and quality health care. These high-tech devices suffer from numerous failures that affect their functionality. In this way, the reliability of the electromedical equipment is fundamental to avoid its collapse. The objective of this work is to analyse the potential of Markov chains in the optimisation of the maintenance of electro-medical equipment. The methodology allows the estimation of degradation and collapse of electromedical equipment. In addition, the necessary methodology was developed to determine the useful life of the electromedical equipment and the characteristics that maintenance must have to guarantee its reliability. As a result, it was obtained that Markov chains are suitable for estimating the degradation of electromedical equipment, allowing proper management of the cost and resources needed to increase their useful life. Therefore, Markov chains make it possible to optimize the budget items related to maintenance and renewal of equipment and to obtain negotiating power with manufacturers or maintenance companies.

Keywords: Markov Chains; electromedicine; service life; cost management; reliability; maintenance.

### **APLICABILIDAD DE LAS CADENAS DE MARKOV EN LA GESTIÓN DE LOS COSTOS DE EQUIPOS ELECTROMÉDICOS.**

Las cadenas de Markov es un modelo probabilístico utilizado para simular comportamientos que cumplan con la propiedad Markoviana de que el evento de estado futuro depende únicamente del evento presente y no del pasado. Los equipos electromédicos son indispensables para poder garantizar una atención sanitaria eficiente y de calidad. Estos equipos de alta tecnología sufren numerosos fallos que afectan a su funcionalidad, por lo que aumentar su fiabilidad es fundamental. El objetivo de este trabajo es analizar el potencial de las cadenas de Markov en la optimización del mantenimiento de equipos electromédicos. Esta metodología permite estimar la degradación y el colapso de equipos electromédicos. Además, se desarrolló la metodología necesaria para determinar la vida útil de los equipos electromédicos y las características que debe tener el mantenimiento para garantizar su fiabilidad. Como resultado se obtuvo que las cadenas de Markov es adecuada para estimar la degradación de los equipos electromédicos, permitiendo gestionar adecuadamente el coste y los recursos necesarios para incrementar su vida útil. Las cadenas de Markov permiten optimizar las partidas presupuestarias relativas al mantenimiento y a la renovación de los equipos y obtener poder negociador con los fabricantes o las empresas de mantenimiento.

Palabras claves: Cadenas de Markov; electromedicina; vida útil; gestión de los costos; fiabilidad; mantenimiento.

Correspondencia: Jaime González Domínguez [jaimegd@unex.es](mailto:jaimegd@unex.es)

Agradecimientos: Este estudio se ha llevado a cabo a través del proyecto de investigación Ref. TE-0017-19 ligado a los Proyectos y ayudas Plan Regional del Servicio Extremeño Público de Empleo.



©2021 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

## 1. Introducción

Los equipos electromédicos son dispositivos de alta tecnología que permiten tanto realizar diagnósticos para la prevención y tratamiento de enfermedades, como facilitar los procedimientos quirúrgicos (Aunión Villa, Gómez-Chaparro & García-Sanz-Calcedo, 2020). Por tanto, el correcto funcionamiento de estos equipos para lograr una atención sanitaria segura y de calidad en los hospitales y centros de salud (Taghipour, Banjevic & Jardine 2008). Son numerosos los fallos que perjudican la funcionalidad de los equipos electromédicos, por lo que se deben realizar las operaciones de inspección y mantenimiento necesarias para disminuir la probabilidad de fallo o colapso. Así, en este tipo de servicios, el coste de las actividades de mantenimiento durante la vida útil de los equipos es una parte muy importante del coste total, superando en numerosas ocasiones al coste inicial (Jamshidi *et al.* 2014). Por tanto, estimar correctamente el coste de esta actividad es imprescindible para garantizar su éxito.

Existen diferentes técnicas y metodologías que permiten determinar el momento óptimo en el que debe realizarse las operaciones de mantenimiento y la estrategia de mantenimiento más adecuada, como pueden ser las Cadenas de Markov (Masetti & Robol, 2020) o el Razonamiento Basado en Casos. El Razonamiento Basado en Casos consiste en solucionar problemas basándose en conflictos que se han producido anteriormente, mientras que las Cadenas de Markov permiten determinar la probabilidad de que suceda un determinado evento tras un tiempo establecido, siempre y cuando el evento a estudiar cumpla la propiedad markoviana (Mejía, Holgun & Betancourt, 2017). La degradación de los equipos electromédicos cumple con esta propiedad, ya que el estado de degradación futuro de los equipos depende únicamente del estado de degradación presente y no del pasado (González-Domínguez, Sánchez-Barroso & García-Sanz-Calcedo, 2020b). Así, el proceso de simulación estocástico de las Cadenas de Markov es ideal para planificar el mantenimiento y, en consecuencia, el coste del servicio de mantenimiento, garantizando que el estado de degradación de los equipos electromédicos sea adecuado durante toda su vida útil (Gómez-Chaparro, García-Sanz-Calcedo & Aunión-Villa, 2020).

Wang y Shen (2014) estimaron el consumo de energía del ciclo de vida de un edificio residencial, mediante el modelado estocástico basado en un modelo de Markov, optimizando diferentes acciones de mantenimiento según el coste de reemplazo de los componentes y en base a un índice multiobjetivo. Chen y Trivedi (2005) establecieron un proceso de decisión semi-Markov (SMDP) para la optimización de la política de mantenimiento preventivo basados en la condición. Además, presentaron un enfoque para la optimización conjunta de la tasa de inspección y de la política de mantenimiento.

Silva, Gaspar y Brito (2016) utilizaron el modelo de Markov para determinar la degradación de tres tipos de revestimientos de fachadas: piedra, cerámica y pintura. Además, determinaron como las características de los revestimientos influyen en la degradación de la fachada y analizaron la influencia de la distancia al mar o la humedad en la degradación. Ortega *et al.* (2015) propusieron diferentes métodos para la predicción de la vida útil de las cubiertas y fachadas más frecuentes en edificación, entre los cuales estaba el modelo de Markov. Compararon diferentes sistemas constructivos para facilitar la labor del técnico en la fase de proyecto del edificio.

Edirisinghe, Setunge y Zhang (2015) utilizaron las Cadenas de Markov para modelar el deterioro de distintos componentes de construcción críticos de edificios comunitarios, obteniendo modelos para predecir de manera confiable su deterioro y

determinando los principales factores que influyen. Coffelt, Hendrickson y Healey (2010) aplicaron el modelo de Markov para determinar el deterioro de comercial de cubiertas y el mantenimiento según la condición, las fugas de agua y su costo. También, Ferreira *et al.* (2019) modelaron la degradación de los revestimientos cerámicos de fachadas, a través de la inspección de 195 edificios de Lisboa mediante una red de Petri y el modelo estocástico que propone las Cadenas de Markov. Gómez y Carnero (2017) utilizaron las Cadenas de Markov para establecer la política de mantenimiento más adecuada para los subsistemas de distribución de energía eléctrica de los centros sanitarios.

Se deduce que el modelo de Markov se ha utilizado en un gran número de investigaciones ingenieriles, verificando su aplicabilidad. A pesar de ser una herramienta muy útil para estimar la degradación y el mantenimiento de los equipos electromédicos, son pocos los precedentes que se han encontrado en el estado del arte.

Pabon *et al.* (2018) calcularon el tiempo de reemplazo debido a la obsolescencia tecnología de equipos médicos de radiología mediante la aplicación de las Cadenas de Markov. Carnero y Gómez (2016) aplicaron las Cadenas de Markov y la medición del atractivo a través de una técnica de evaluación basada en categorías (MACBETH) para establecer la política de mantenimiento más adecuada para cuatro subsistemas de diálisis de un centro de salud. Dhillon (2011) además de otras técnicas analíticas clásicas, emplearon las Cadenas de Markov para mejorar la fiabilidad y mantenimiento de los equipos médicos. Ospina, Cardona y Guerrero (2017) diseñaron un modelo de Cadenas de Markov de tiempo continuo para modelar tres estados de los equipos de tomografía computarizada (funcionando, mantenimiento preventivo y mantenimiento correctivo), pero sin realizar una estimación de la degradación porcentual de los equipos de alta tecnología en base a un histórico de datos.

En la Tabla 1 se muestran distintos estudios previos que han utilizado las Cadenas de Markov.

**Tabla 1: Estado del arte de las Cadenas de Markov aplicadas a investigaciones ingenieriles.**

Autores	Alcance	Metodología	Resultados
Wang y Shen	Consumo de energía	Cadenas de Markov	Optimización del mantenimiento de reemplazo
Chen y Trivedi	Desarrollo de metodología	Proceso de decisión de semi-Markov	Optimización mantenimiento preventivo
Silva <i>et al.</i>	Degradación de revestimientos	Cadenas de Markov	Influencia de distintas características en la degradación
Ortega <i>et al.</i>	Cubiertas y fachadas	Metodologías de predección	Vida útil
Edirisinghe <i>et al.</i>	Degradación de elementos	Cadenas de Markov	Modelo de degradación

	constructivos críticos		
Coffelt <i>et al.</i>	Degradación de cubiertas de edificios comerciales	Cadenas de Markov	Mantenimiento de cubiertas
Ferreira <i>et al.</i>	Revestimientos cerámicos	Cadenas de Markov	Modelo de degradación
Gómez y Carnero	Distribución energía centros sanitarios	Cadenas de Markov	Establecimiento de la política de mantenimiento
Pabon <i>et al.</i>	Equipos electromedicos	Cadenas de Markov	Reemplazo por obsolescencia
Carnero y Gómez	Equipos de diálisis	Cadenas de Markov y MACBETH	Política de mantenimiento más adecuada
Dhillon	Equipos médicos	Cadenas de Markov	Fiabilidad y mantenimiento
Ospina <i>et al.</i>	Tomografía axial computerizada	Cadenas de Markov	Mantenimiento preventivo y correctivo

En esta investigación se expone una herramienta contrastada permite planificar las operaciones de mantenimiento de los equipos electromédicos, a través de la mejora las estimaciones actuales de esta actividad. Así, no solo se reducen los tiempos de reparación y sustitución, sino que también se incrementa la precisión de la estimación de costos del servicio de mantenimiento.

## 2. Objetivos

Este estudio tiene como objetivo general el desarrollo de la metodología de las cadenas de Markov para la optimización del mantenimiento de los equipos electromedicos. Esta herramienta probabilística permite calcular la política y frecuencia de mantenimiento óptima de estos equipos de alta tecnología. Como objetivo específico se realiza una profunda contextualización del problema y del estado del arte. Además, se expondrá las ventajas e inconvenientes de esta metodología.

## 3. Metodología

Las Cadenas de Markov es un proceso estocástico basado en la propiedad markoviana de que la probabilidad de que suceda un evento futuro depende únicamente del evento presente y no del pasado. Así, es posible modelar adecuadamente la degradación que sufren determinados sistemas a lo largo del tiempo (Papakonstantinou & Shinozuka, 2014).

Para poder modelar la degradación de los equipos electromédicos mediante las Cadenas de Markov es necesario disponer de una base de datos para que la estimación de la condición de los equipos sea adecuada. Estos datos proceden de

inspecciones realizadas con una frecuencia específica y, durante estas, se determina el estado de condición que presentan cada equipo a lo largo del tiempo.

Primeramente, es necesario definir los estados de degradación que pueden presentarse en los equipos de degradación. El conjunto de los estados de degradación de los equipos se denomina escala de degradación y van desde una condición excelente hasta el colapso (González-Domínguez, Sánchez-Barroso & García-Sanz-Calcedo, 2020a). Para poder identificar estos estados durante las inspecciones es necesario realizar una correcta descripción de cada uno de ellos e identificar las principales incidencias que afectan a su correcta funcionalidad. Además, debido a la complejidad de los equipos, es necesario que tanto la definición de los estados de degradación como las inspecciones las realicen expertos en el mantenimiento de los equipos electromédicos analizados.

Dentro de los estados de degradación definidos, se deben especificar los estados de degradación que se consideran asumibles y cuales deben evitarse. De manera que el mantenimiento de los equipos deberá realizarse para que su estado de degradación no siempre sea adecuado.

Para poder establecer el tiempo que los equipos electromédicos tardan en llegar al estado inaceptable, y por lo tanto la periodicidad de las tareas de limpieza, es necesario obtener la matriz de transición de estados de los equipos (Grussing et al. 2016). En la Figura 1 se muestra la matriz de transición de estados.

**Figura 1: Matriz de transición de estados**

$$[T] = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & \cdot & \cdot & T_{1i} \\ T_{21} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ T_{j1} & \cdot & \cdot & \cdot & T_{ij} \end{bmatrix}$$

Para ello, primero se debe obtener la matriz de observación para los  $n$  periodos analizados. La matriz de observación,  $[O]$ , cuantifica el número de equipos que se encuentra en cada uno de los estados de degradación tras un periodo  $n$ . Los elementos que constituyen la matriz de observación se denominan  $O_{ij}$  y representan en número de equipos que se encuentran en el estado  $j$  estando inicialmente en el estado  $i$ .

A partir de los elementos de la matriz de observación se obtiene probabilidad de que el equipo pase de un estado de condición  $i$  a un estado  $j$  en un tiempo determinado. Al conjunto dichas probabilidades se le denomina matriz de transición. La Ecuación (1) se determina los elementos de la matriz de transición  $T_{ij}$ .

$$T_{ij} = O_{ij} / \sum_{i=1}^3 O_i \quad (1)$$

Donde  $O_{ij}$  son los elementos de la matriz de observación,  $O_i$  los elementos de la fila  $i$  de la matriz de observación y  $T_{ij}$  los elementos de la matriz de transición de estados. Una vez obtenido la matriz de transición de estados, se utilizaron las Cadenas de Markov para determinar esta matriz para los  $n$  periodos analizados.

Tras esto, se calculó la matriz de estimación. Esta matriz representa el número de equipos que se encuentran en cada uno de los estados de degradación según el modelo propuesto por las Cadenas de Markov. Así, es posible comparar el número de equipos observados durante las inspecciones y el calculado según Markov en los

$n$  periodos analizados. Los elementos de la matriz de estimación se expresan en la Ecuación (2).

$$E_{ij} = T_{ij} \cdot \sum_{i=1}^3 O_i \quad (2)$$

Donde  $P_{ij}$  son los elementos de la matriz de transición de estados,  $O_i$  los elementos de la fila  $i$  de la matriz de observación y  $E_{ij}$  los elementos de la matriz de predicción. A continuación, se calcula el error que se produce entre lo observado y lo predicho por las Cadenas de Markov para los  $n$  periodos analizados. Los elementos de la matriz error corresponden con la diferencia entre los elementos de la matriz observación menos los elementos de la matriz de estimación al cuadrado, tal como se expresa en la Ecuación (3).

$$F_{ij} = (O_{ij} - E_{ij})^2 \quad (3)$$

Donde los elementos de la matriz error se denominan  $F_{ij}$ . Con esto, se suma el error que se produce en los elementos que constituyen la matriz de error para los  $n$  periodos analizados. Así, mediante el complemento Solver de Microsoft Excel, se obtiene la matriz de transición del primer periodo que minimice el error total que se produce entre lo observado y lo estimado por Markov. Para validar el modelo de Markov, se utiliza la prueba de  $X^2$  de Pearson. Esta prueba permite establecer si la discrepancia entre lo observado y lo predicho tiene un nivel de significancia adecuado (Edirisinghe, Setunge & Zhang 2015). En la Ecuación (4) se muestra la expresión de  $X^2$  de Pearson.

$$X^2 = \sum_i^n \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} \quad (4)$$

#### 4. Resultados

Una vez validada la matriz, es posible determinar la probabilidad de que un equipo electromédico se encuentre en uno de los estados de degradación definidos. Conocido el estado inicial del equipo y definida la estrategia de mantenimiento, se determinó la probabilidad de que se encuentre en cada uno de los estados de condición en un periodo  $n$ . Esto se expresa en la Ecuación (5).

$$E_n = E_{n-1} \cdot [M] \cdot [T]^n \quad (5)$$

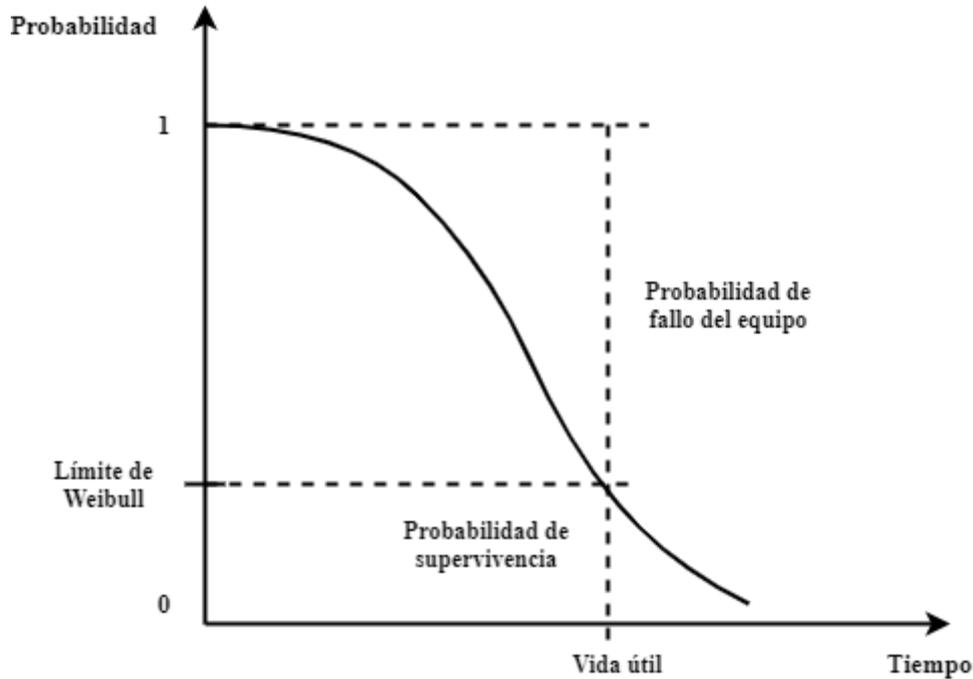
Donde  $E_n$  corresponde con el vector de estados en el periodo  $n$ ,  $E_{n-1}$  es el vector de estados en el periodo anterior al calculado,  $[M]$  es la matriz de mantenimiento y  $[T]^n$  es la matriz de transición de estados en el periodo  $n$ . Una vez obtenido el vector de estados, se determina la fiabilidad de los equipos a lo largo del tiempo. La fiabilidad,  $F$ , es la probabilidad de que el equipo se encuentre en los estados de degradación aceptables tras un tiempo determinado. Esta variable sirve para determinar si la condición de los equipos es adecuada para garantizar su funcionalidad. La fiabilidad de los equipos se determinó con la Ecuación (6).

$$F = E_n \cdot L \quad (6)$$

Siendo  $F$  la fiabilidad del componente y  $L$  el vector de condición limite. Este vector adquiere el valor unitario para aquellos estados que se consideran adecuados y valor

nulo para el estado de condición inaceptable. Con el valor de fiabilidad es posible determinar cuando la degradación de los equipos no es adecuada para garantizar su funcionalidad y, en consecuencia, es necesario aplicar operaciones de mantenimiento. Para poder establecer cuando el valor de fiabilidad no es adecuado, se toma como referencia el valor de vida característica de la distribución de Weibull. Si la fiabilidad adquiere un valor inferior a este parámetro, se considera que la condición de los equipos no es lo adecuada y, por lo tanto, deben realizarse tareas de mantenimiento. En la Figura 2 se muestra una curva de fiabilidad de un sistema.

**Figura 2: Curva de fiabilidad de un sistema**



A continuación, se agrupan los valores de fiabilidad obtenidos a lo largo del tiempo, con el fin de determinar la curva de fiabilidad. De esta manera, se comprueba si la curva se asemeja a la función de fiabilidad. La función de fiabilidad o supervivencia mide la probabilidad de que el equipo tenga un estado de degradación adecuado tras un periodo de tiempo determinado.

Para tipificar la función de fiabilidad o supervivencia de los equipos,  $S(t)$ , se empleó la función distribución de Weibull,  $W(t)$ . La función supervivencia es complementaria a la función distribución. Esto se refleja en las ecuaciones (7) y (8).

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta} \quad (7)$$

$$S(t) = 1 - R(t) \quad (8)$$

Dónde  $R$  es la probabilidad de que la cubierta pueda realizar su funcionamiento correctamente en un tiempo dado ( $t$ ) y  $\alpha$  y  $\beta$  son coeficientes adimensionales que generan la forma de característica de la curva. A partir de estas funciones, es posible determinar la función densidad de fallo, función fallo y la tasa de fallo de los equipos electromédicos. Con toda esta información se puede determinar el tiempo año óptimo en el que deben realizarse las operaciones de mantenimiento maximizando en todo momento la fiabilidad de los equipos, es decir, que los equipos se encuentren en un estado de degradación adecuado. Además, se determina la

estrategia de mantenimiento que debe llevarse a cabo.

A partir de las funciones obtenidas, se puede analizar la vida útil de los equipos en función de la fiabilidad y el mantenimiento. Además, se pueden determinar los fallos de los equipos en función del tiempo.

## 5. Conclusiones

Las Cadenas de Markov es una herramienta que permite perfeccionar la planificación y el coste del servicio de mantenimiento de equipos electromédicos.

La metodología de las Cadenas de Markov permite predecir la vida útil de los equipos y minimizar el tiempo en el que se encuentran fuera de uso en base a su fiabilidad. Esto permite disminuir el riesgo de colapso de los equipos y garantizar un estado de degradación adecuado. La herramienta predice la degradación y, en consecuencia, el mantenimiento necesario tanto de los equipos de nueva instalación como de los que actualmente están en funcionamiento. También, es útil para contrastar los presupuestos y la programación realizada por las empresas mantenedoras de equipos electromédicos.

Por último, destacar que la metodología desarrollada es fácilmente actualizable ante variaciones como el cambio tecnológico de los equipos, mientras que presenta algunas limitaciones como la necesidad de disponer de una amplia base de datos.

Los futuros trabajos deben encaminarse a comparar la metodología de Markov con otras metodologías existentes, destacando las ventajas e inconvenientes de cada una de ellas.

## 6. Referencias

- Aunión-Villa, J., Gómez-Chaparro, M., & García-Sanz-Calcedo, J. (2020). Assessment of the maintenance costs of electro-medical equipment in Spanish hospitals. *Expert Review of Medical Devices* 17(8):855-865.
- Carnero, M. C., & Gómez, Á. (2016). A Multicriteria Decision Making Approach Applied to Improving Maintenance Policies in Healthcare Organizations. *BMC Medical Informatics and Decision Making* 16(1):47.
- Carnero, M. C., & Gómez, Á. (2017). Maintenance Strategy Selection in Electric Power Distribution Systems. *Energy* 129:255–72.
- Chen, D., & Trivedi, K. S. (2005). Optimization for Condition-Based Maintenance with Semi-Markov Decision Process. *Reliability Engineering and System Safety* 90(1):25–29.
- Cheng, Q., Wang S., & Yan, C. (2016). Robust Optimal Design of Chilled Water Systems in Buildings with Quantified Uncertainty and Reliability for Minimized Life-Cycle Cost." *Energy and Buildings* 126:159–69.
- Coffelt, D. P., Hendrickson C. T., & Healey, T. S. (2010). Inspection, Condition Assessment, and Management Decisions for Commercial Roof Systems. *Journal of Architectural Engineering* 16(3):94–99.

- DHILLON, B. S. (2011). Medical equipment reliability: A Review, analysis methods and improvement strategies. *International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering* 18(04):391–403.
- Edirisinghe, R., Setunge, S. & Zhang, G. (2015). Markov Model—Based Building Deterioration Prediction and ISO Factor Analysis for Building Management. *Journal of Management in Engineering* 31(6):04015009.
- Ferreira, C., Neves, L. C. Silva, A. & de Brito, J. (2019). Stochastic Petri-Net Models to Predict the Degradation of Ceramic Claddings. *Building Research and Information* 47(6):697–715.
- Gómez-Chaparro, M., García-Sanz-Calcedo, J., & Aunió-Villa, J. (2020). *Maintenance in hospitals with less than 200 beds: efficiency indicators..* Building Research and Information, 48(5):526-537.
- González-Domínguez, J., Sánchez-Barroso, G., & García-Sanz-Calcedo, J. (2020a). Preventive Maintenance Optimisation of Accessible Flat Roofs in Healthcare Centres Using the Markov Chain. *Journal of Building Engineering* 32:101775.
- González-Domínguez, J., Sánchez-Barroso, G. & García-Sanz-Calcedo, J. (2020b). Scheduling of Preventive Maintenance in Healthcare Buildings Using Markov Chain. *Applied Sciences* 10(15):5263.
- Grussing, M. N., Liang Y. Liu, L. Y., Uzarski, D. R., El-Rayes, K. & El-Gohary, N. (2016). Discrete Markov Approach for Building Component Condition, Reliability, and Service-Life Prediction Modeling. *Journal of Performance of Constructed Facilities* 30(5):04016015.
- Jamshidi, A., Abbasgholizadeh Rahimi, S., Ait-kadi, D., & Ruiz, A. (2015). A Comprehensive Fuzzy Risk-Based Maintenance Framework for Prioritization of Medical Devices. *Applied Soft Computing* 32:322–34.
- Masetti, G., & L. Robol. (2020). Computing Performability Measures in Markov Chains by Means of Matrix Functions. *Journal of Computational and Applied Mathematics* 368:112534.
- Mejía, A. Escobar, M. Holguin, & G. Betancourt. (2007). Uso de Las Cadenas de Markov En La Selección de Políticas de Mantenimiento. *Scientia Et Technica* 34(13):115–20.
- Ortega M., Begoña, L., Lanzarote, S. & Fran Bretones, J. M. (2015). Proposed Method of Estimating the Service Life of Building Envelopes. *Revista de La Construcción*

14(1):60–68.

Ospina, V. E., and Cardona, F. & Guerrero. W. J. (2017). Information Technologies and Analytics as Decision Support Systems in Hospital Logistics: Four Research Experiences in the Colombian Case. *International Journal of Things Web Service* 2:136–41.

Pabon, A., Gaviria, A. L., Wilches, A. M. & Bravo, J. J. (2018). Análisis Causal de Reemplazo de Equipos Médicos Radiológicos a Causa de Obsolescencia Tecnológica. *Revista Espacios* 39:9.

Papakonstantinou, K. G., & Shinozuka, M. (2014). Optimum Inspection and Maintenance Policies for Corroded Structures Using Partially Observable Markov Decision Processes and Stochastic, Physically Based Models. *Probabilistic Engineering Mechanics* 37:93–108.

Silva, A., Gaspar P. L., de Brito, J. & Neves, L. C. (2016). Probabilistic Analysis of Degradation of Façade Claddings Using Markov Chain Models. *Materials and Structures* 49(7):2871–92.

Taghipour, S., Banjevic, D. & Jardine, A. K. S. (2008). Risk-Based Inspection and Maintenance for Medical Equipment. P. 2008 in *Proceedings of the 2008 Industrial Engineering Research Conference*.

**Comunicación alineada con los  
Objetivos de Desarrollo  
Sostenible**

