



Análisis de componentes principales en los motores de combustión interna HYUNDAI 1.7 MW

Analysis of main components in HYUNDAI 1.7 MW internal combustion engines

Rasvel Aliaga Naranjo¹*, Francisco de la Torre Silva², Ángel Alexander Rodríguez Soto³, Joel Guillén García⁴

¹Unidad Empresarial de Base de Generación Distribuida. Granma, Cuba.

²Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría". La Habana, Cuba.

³Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Chile.

⁴Universidad Técnica de Manabí. Manta, Ecuador.

*Autor de correspondencia: rasvel@grm.emgef.une.cu

Recibido: 9 de junio de 2020

Aprobado: 29 de noviembre de 2020

Licencia de uso y distribución Creative Commons Reconocimiento-No Comercial 4.0 Internacional



RESUMEN/ABSTRACT

En la investigación se realizó el análisis de la base de datos on-line del sistema mecánico dinámico funcional del motor de combustión interna HYUNDAI 1.7 MW, ubicado en la Central de generación eléctrica de Bayamo. Describiendo el sistema de monitoreo instalado, utilizando el sistema de supervisión, control y adquisición de datos (SCADA), se aplicó la técnica multivariable de análisis de componentes principales (ACP) en el periodo 2015 – 2019 para determinar la influencia de los parámetros-síntomas en la variabilidad del comportamiento mecánico dinámico, siendo este el objetivo de la investigación. Las variables analizadas más relevantes son: presión de agua de entrada al radiador, presión de agua de alta temperatura, presión de agua de baja temperatura y presión de agua a la salida del radiador, siendo estas las que obtienen mayor variabilidad del sistema. Identificándose 4 componentes principales, resultando los de más variabilidad referida al comportamiento del equipo estudiado.

Palabras clave: Análisis Componentes Principales, Motores Hyundai 1.7 MW, supervisión, control y adquisición de datos.

The investigation carried out the analysis of the online database of the functional dynamic mechanical system of the HYUNDAI 1.7 MW internal combustion engine, located at the Bayamo power generation plant. Describing the installed monitoring system, using the supervision, control and data acquisition system (SCADA), the multivariate principal component analysis (PCA) technique was applied in the period 2015 - 2019 to determine the influence of the parameters-symptoms in the variability of dynamic mechanical behavior, this being the objective of the research. The most relevant variables analyzed are: radiator inlet water pressure, high temperature water pressure, low temperature water pressure and water pressure at the radiator outlet, these being the ones that obtain the greatest system variability. Identifying 4 main components, resulting in the most variability related to the behavior of the team studied.

Keywords: On-line database analysis, Hyundai 1.7 MW engines, supervision, control and data acquisition, Principal Component Analysis.

Cómo citar este artículo:

Rasvel Aliaga Naranjo, *et al.* Análisis de componentes principales en los motores de combustión interna HYUNDAI 1.7 MW. 2021, vol. 42, n. 1, enero/abril. ISSN:1815-5901.

Sitio de la revista: <http://rie.cujae.edu.cu/index.php/RIE>

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la generación de energía eléctrica en Cuba, bajo el programa de la Revolución Energética decide pasar a una Generación Distribuida a base de motores de combustión interna y otros equipos. Para ese entonces no quedó otra alternativa que desarrollar un sistema de gestión, que permita establecer y normar la nueva forma de explotar y controlar este tipo de generación, un renglón que no se puede despreciar para mantener una eficiencia elevada.

El mantenimiento predictivo [1], les brinda a los equipos encargados de la generación una estrategia de atención, el autor en [2], expreso que el mantenimiento predictivo se emplea para la determinación del volumen de las tareas en la reparación de un equipo, este autor no tuvo en cuenta que empleando una base de datos para el mantenimiento de los motores de combustión se puede trabajar con las principales variables que pueden afectar comportamiento mecánico - dinámico - funcional del motor.

En [3], plantea en su investigación la proposición de la utilización del análisis de criticidad como forma de poder tener criterio sobre los elementos que más inciden en el desempeño de un grupo motor - generador, si bien es válida la investigación la misma no toma partido en la determinación de los parámetros que más puedan estar afectando este desempeño.

Para el análisis de parámetros síntomas y corregir posibles fayas en máquinas vibratorias en la variabilidad del comportamiento mecánico – dinámico – funcional, del motor de combustión como lo expresan [4,5], aunque no toman partido para el uso de información asociada a los mismos en el tiempo, siendo esta una insuficiencia de estos trabajos.

El presente trabajo tuvo como objetivo la determinación de la influencia de los parámetros síntomas en la variabilidad del comportamiento mecánico dinámico del equipo analizado, como resultado se pudo identificar 4 componentes principales los cuales acopiaron el mayor aporte en la variabilidad referida al comportamiento del equipo de estudio. En el análisis de las variables se demostró que la presión de agua entrada al radiador, la presión de agua de alta temperatura, la presión de agua de baja temperatura y la presión de agua a la salida del radiador, fueron las más significativas en el resultado que es solamente válido dentro del conjunto de variables que mide el (SCADA) en este trabajo.

MATERIALES Y MÉTODOS

En el estudio realizado se emplearon métodos teóricos, empíricos y estadísticos comprendió el periodo del 2015 – 2019, las herramientas utilizadas fueron la base de datos de la SCADA y se aplicó la técnica de análisis multivariado y de componentes principales [6, 7], para determinar la influencia de los parámetros-síntomas en la variabilidad del comportamiento mecánico-dinámico-funcional, de los motores de combustión interna HYUNDAI 1.7 MW. Se les realizó el estudio a 10 parámetros síntomas que son indicadores del comportamiento mecánico-dinámico-funcional del motor, con el estudio de las 31 instancias de medición, se pudo analizar la variabilidad del sistema. Resulta necesario trabajar con variables que brinden suficiente información sobre el proceso técnico general del motor, relacionando este con la variabilidad o varianza de los valores medidos en las variables y no con la cantidad de variables [8]: presión combustible, temperatura combustible, presión de aceite a la entrada del motor, presión de aceite diferencial, presión de aceite a la entrada del turbo, presión de agua entrada al radiador, presión de agua salida al radiador, presión de agua de baja temperatura, presión de agua de alta temperatura, temperatura interior del contenedor.

Para los análisis que se realizaron en la investigación se creó un grupo de expertos partiendo de un grupo de especialistas que se le aplicó la herramienta de análisis de experticia [9, 10]

RESULTADOS y DISCUSIÓN

En la tabla 1, se muestra los especialistas que se le aplicó la herramienta de análisis de expertos

Tabla 1. Muestra de los especialistas que se le aplicó la herramienta de análisis de expertos.

No	Actividad	Experiencia profesional
1	Mantenimiento	24
2	Mantenimiento	15
3	Mantenimiento	6
4	Operación	22
5	Operación	12
6	Mantenimiento	20
7	Operación	18
8	Control de la Calidad	10

Aplicando las herramientas descritas en [8], se llega a los siguientes resultados que se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Resultados del análisis de expertos.

Especialistas	Kc	Ka	K
1	0,9	0,994	0,947
2	0,9	0,998	0,949
3	0,8	0,897	0,848
4	0,8	0,798	0,799
5	0,8	0,796	0,798
6	1,0	0,794	0,897
7	0,3	0,652	0,476
8	0,9	0,796	0,848

Se acepta como expertos todos los especialistas que obtuvieron calificación superior a 0.6 desechándose de la lista el especialista 7, todas las decisiones serán evaluadas a través de tormenta de ideas con este grupo.

Para mostrar la obtención de los componentes principales se tomó en el mes de abril del año 2019, el motor 5 que se comportó de manera estable debido a que la variabilidad de los valores tomados, correspondió a los cambios aleatorios normales de operación [8], y no se mostró ninguna dificultad de origen mecánico, tecnológico o de operación. En la tabla 3, se ordenan los valores propios, de mayor a menor (enginevalue).

Tabla 3. Valores propios del resultado del ACP en abril 2019.				
Componentes	Valor propio	% total de varianza	Valor propio acumulado	Acumulado %
1	2.579407	25.79407	2.57941	25.7941
2	1.916444	19.16444	4.49585	44.9585
3	1.404588	14.04588	5.90044	59.0044
4	0.968053	9.68053	6.86849	68.6849
5	0.936172	9.36172	7.80466	78.0466
6	0.697414	6.97414	8.50208	85.0208
7	0.585034	5.85034	9.08711	90.8711
8	0.423854	4.23854	9.51097	95.1097
9	0.337964	3.37964	9.84893	98.4893
10	0.15107	1.5107	10	100

Estos valores propios representan la magnitud de la proyección hacia la máxima variabilidad de la muestra de referencia, es decir, el componente 1 va a poseer el mayor valor propio siendo este el que más información brinda en cuanto a variabilidad, mostrando en este caso un 25.7 % de la variabilidad total del modelo estudiado. El componente número 2 recoge un 19.16 % de la variabilidad total restante, el componente 3 recoge un 14.04 %, el cuarto componente recoge un 9.68 %, y así cada componente va recogiendo un porcentaje de la variabilidad total. Por lo tanto, queda evidenciado que los primeros componentes son los más importantes debido a que son los que mayor contribución a la varianza total reportan. Por consiguiente, ya los últimos componentes dejan de tener significados en el estudio y no se denominan principales. Para determinar los componentes principales se utiliza el criterio del gráfico de sedimentación de los mismos, a su vez, suele ser utilizado como contraste gráfico para conocer el número de componentes a retener. Según este criterio se retienen todos los componentes que están situados previamente en la zona de sedimentación, entendiendo por esta, la parte del gráfico en la que los componentes empiezan a no presentar pendientes fuertes, y como se muestra en la figura 1, para los datos obtenidos se pueden seleccionar hasta 4 componentes, como principales. Se observa que el punto que coincide con el cambio brusco de pendiente corresponde al número 3, el que reporta una varianza de 14.05 % y ya el 4 componente reporta una varianza de 9.68 %, es decir, va disminuyendo porcentualmente a la contribución de la variabilidad.

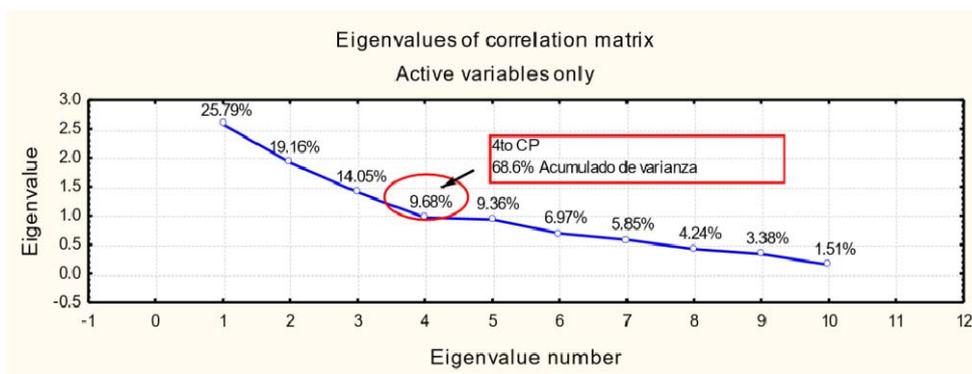


Fig. 1. Gráfico de sedimentación para determinar los componentes principales.

Si se considera además el criterio del valor propio resulta que se puede también seleccionar hasta el componente 4, debido a que este reporta una variabilidad acumulada del 68.6 % del total, siendo este valor porcentual suficiente para decidir el estudio de 4 componentes como principales.

El ACP [7, 11] explica con mayor extensión la menor cantidad de elementos, y la extracción de componentes se detiene cuando empiezan a explicar poca varianza.

Mediante la reducción de dimensionalidad se obtienen componentes principales que explican la máxima variabilidad de las variables originales, por lo que las variables que mayor contribución tengan en los primeros componentes seleccionados como principales, serán las variables de mayor importancia para su control y vigilancia en el período posterior al análisis, pues estos podrían estar asociados a la variabilidad del comportamiento del motor [8, 12] para determinar los parámetros-síntomas que tendrán mayor variabilidad en el comportamiento mecánico-dinámico-funcional del mismo. En la tabla 4, se muestra la contribución de las variables a los 4 componentes principales seleccionados. Los valores de contribución de las variables se muestran en porcentaje con el objetivo de ofrecer una mejor visualización de la información. Las variables que más influyen en el componente principal 1 son: la presión de aceite diferencial, presión de aceite a la entrada del motor, presión de combustible, presión de agua de alta temperatura, temperatura interior de contenedor y presión de agua salida del radiador, representando estas variables el 85.02 % de la variabilidad del componente, siendo este el que mayor información brinda en cuanto a variabilidad. Es preciso observar con mayor sistematicidad el comportamiento de las variables que contribuyen en gran medida a los componentes principales, porque son las que más aportan a la variabilidad del comportamiento del motor analizado.

Tabla 4. Contribución de las variables de abril 2019.

Variable	CP1(%)	CP2(%)	CP3 (%)	CP4 (%)
Presión de combustible	12	1	11	25
Temperatura de Combustible	2	16	18	1
Presión de aceite a la entrada del motor	24	3	2	1
Presión de aceite diferencial	29	1	1	4
Presión de aceite a la entrada del turbo	1	35	1	1
Presión de agua entrada al radiador	2	24	2	1
Presión de agua salida al radiador	8	2	12	27
Presión de agua de baja temperatura	1	2	34	8
Presión de agua de alta temperatura	10	10	1	1
Temperatura interior del contenedor	9	4	15	32

Por la cantidad de variables utilizadas en el análisis y por los resultados numéricos obtenidos, se decide marcar de color azul claro los valores de contribución de las variables que exceden al 10 % del aporte a cada componente, debido a que se considera que este porcentaje es suficiente para representar una alta variabilidad de los componentes principales. Si se toman todas las variables que proporcionen más de un 10 % al primer componente, la sumatoria de estos porcentajes resultaría el 94 % de la variabilidad total del componente principal 1, por lo que en esta selección las variables que más varianza aportan representan más de la mitad del porcentaje de contribución al primer componente. Las variables de mayor rendimiento a la contribución de los componentes principales, son las más importantes, debido a que las mismas capturan la mayor variabilidad del proceso. Esta variabilidad está asociada con el comportamiento del motor, y se genera un resultado para posteriores análisis exploratorios de la condición de la máquina [11]. La figura 2, muestra un círculo de correlación donde la interpretación resulta homóloga a la tabla 4 de contribución de las variables. En la misma se expone otra forma de visualizar las relaciones entre variables originales y componentes, en este caso se selecciona como muestra a presentar la proyección del componente principal 1 vs componente principal 2, debido a que en el plano solo se pueden visualizar 2 componentes [8], pues las proyecciones son ortogonales en el espacio. Los valores que se encuentran circulados de color negro muestran las variables que mayor contribución reportan al componente principal 1 por tanto, son las más significativas en este modelo de estudio. Al ser las cargas factoriales (Contribución de las variables) los coeficientes de correlación entre variables y componentes brindan una aproximación a la interpretación de los componentes.

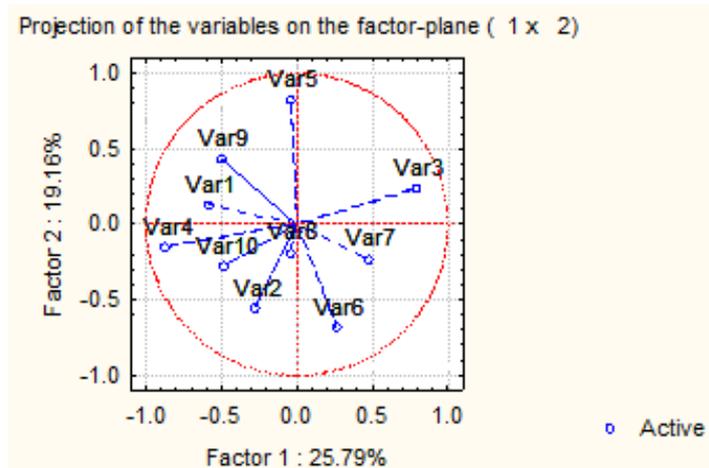


Fig. 2. Gráfico de la proyección de las variables originales de los componentes principales 1 y 2.

En el gráfico anterior se realizó una aproximación entre las mediciones cercanas, observándose que todas las mediciones ubicadas en la nube de puntos, están en el mismo rango, sin embargo, esto puede suscitar un comportamiento inadecuado en el funcionamiento del motor figura.3.

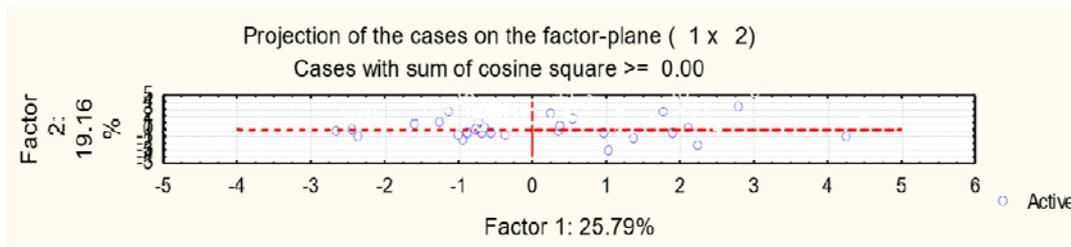


Fig. 3. Gráfico de proyección de los casos de medición entre los factores 1 y 2.

Se realizó un estudio integral de la influencia de las variables originales en la variabilidad del sistema, a lo largo de nueve meses. De esta forma se minimiza una de las limitantes de la aplicación de la ACP, el ser invariante en el tiempo. Al realizar el ACP por meses se obtienen, mediante los resultados, los cambios en la variabilidad del comportamiento del motor en todo el período, presentando como primer resultado la tabla 5, donde se muestra por cada mes los reportes de la varianza explicada en el componente principal número uno. Este explica aproximadamente un 25.7941% de varianza promediada del ACP de todos los meses, demostrando así la importancia que tiene en el análisis de la contribución de la varianza por parte de las variables originales.

Tabla. 5. Varianza explicada por el componente principal 1 en cada mes estudiado.		
Meses 2016	Valor propio	% Total Varianza
Abril	2.579407	25.7941
Mayo	1.916444	44.9585
Junio	1.404588	59.0044
Julio	0.968053	68.6849
Agosto	0.936172	78.0466
Septiembre	0.697414	85.0208
Octubre	0.585034	90.8711
Noviembre	0.423854	95.1097
Diciembre	0.337964	98.4893

Por el grado de significación que tiene en cuanto a información el primer componente, se realiza un análisis del mismo respecto a las variables en todos los meses de estudio.

En la tabla 6, se muestra la contribución de las variables originales de estudio al componente número uno en cada mes, siendo de interés resaltar todas aquellas variables que a lo largo del tiempo le reportan más del 10 % de la variabilidad total al principal componente. Se consideraron los valores porcentuales mayores de 10 como influyentes, porque en todos los meses analizados la sumatoria de las variables identificadas resultan un aporte mayor del 50 % de la variabilidad total hacia el primer componente, y por lo tanto estas variables son las que más influyen en la variabilidad del comportamiento del motor.

Tabla. 6. Contribución de las variables al componente principal 1 por cada mes analizado en %.

Variables	1	2	3	4	5	6	7
Presión del combustible	12	1	11	25	7	7	1
Temperatura Combustible	2	16	18	1	10	10	12
Presión de aceite a la entrada del motor	24	3	2	1	7	1	22
Presión de aceite diferencial	29	1	1	4	1	5	3
Presión de aceite a la entrada del turbo	1	35	1	1	7	1	6
Presión de agua entrada al radiador	2	24	2	1	2	50	3
Presión de agua salida al radiador	8	2	12	27	11	7	1
Presión de agua de baja temperatura	1	2	34	8	27	8	5
presión de agua de alta temperatura	10	10	1	1	25	8	40
Temperatura interior del contenedor	9	4	15	32	1	1	5

Se marcaron con color azul oscuro los valores de la contribución de las variables que proporcionan un por ciento mayor a 10, de las diez variables analizadas en la tabla 6. Se detectó que los parámetros con mayor influencia durante el periodo analizado son: la presión de agua entrada al radiador, la presión de agua de alta temperatura y la presión de agua de baja temperatura, así como el parámetro presión de agua salida al radiador, siendo estos parámetros los que mayor variabilidad muestran al componente principal 1 en el periodo estudiado, por lo tanto, son las que más aportan a la variabilidad del comportamiento mecánico- dinámico funcional del motor analizado a diferencia de lo explicado por [13].

CONCLUSIONES

Se realizó la limpieza y procesamiento de las bases de datos, se obtuvo la influencia cuantitativa de los parámetros-síntomas en la variabilidad del comportamiento del motor a partir de la selección de los componentes principales y las variables analizadas, lo que demostró que las más significativas fueron: la presión de agua entrada al radiador, la presión de agua de alta temperatura y la presión de agua de baja temperatura, así como el parámetro presión de agua a la salida del radiador, las cuales recogieron la mayor variabilidad y se identificaron 4 componentes principales, los cuales acopian el mayor aporte en la variabilidad referida al comportamiento de los grupos electrógenos.

REFERENCIAS

- [1] PALOMINO Marín, Evelio, *et al.* "Monitorado de condición en grupos electrógenos basado en análisis de vibraciones por bandas espectrales". Revista Ingeniería Mecánica. 2018. vol. 21, n. 3, p. 130-137. ISSN 1815-5944. Disponible en: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKewiuybsSsZTuAhVO1VkkHfS0DX0QFjAAegQIAxAC&url=https%3A%2F%2Fingenieriamecanica.cujae.edu.cu%2Findex.php%2Frevistaim%2Farticle%2Fdownload%2F591%2F1069&usg=AOvVaw03u8yA4B8gGtBQByO4_F55
- [2] DVORNIK Josko; Goran Kovacevic; Srđan Dvornik. "Analysis of the Operational Reliability of the Rotary Cup Burner of a Marine Boiler". International Journal of Mechanical Engineering. 2016; vol. 1, p. 55-61. ISSN 2367-8968. Disponible en: <https://www.ijar.org/ijar/filedownloads/ijme/2016/012-0010.pdf>
- [3] PADURA alfonso, *et al.* "Análisis de criticidad en los sistemas mecánicos de los grupos electrógenos". Ingeniería Energética. 2017 v. 38, n. 3, p. 224-230, ISSN: 1815-5901. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59012017000300009

- [4] R. B. Elio, Carlos B. R, Fernando R.P. "Evaluación del valor de las variables de diagnóstico en motores de combustión interna". Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias. 2016, vol. 25, n.3. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/308013793_Evaluation_of_diagnosis_variable_values_of_diesel_internal_combustion_engine?channel=doi&linkId=57d6a45c08ae601b39abedfb&showFulltext=true ; DOI: <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.27113.08806>
- [5] Watkins N. W., Pruessner G, Chapman SC. "25 years of Self-organized Criticality: Concepts and Controversies". Space Sci Rev. 2016; vol. 198, n. 1, p. 3-44. ISSN 0038-6308. Disponible en: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s11214-015-0155-x.pdf>
- [6] VYCHUZHANIN Vladimir; *et al.* "Cognitive Model of the Internal Combustion Engine". En: SAE International Powertrains, Fuels & Lubricants Meeting. Heidelberg, Germany: SAE, 2018. [Consultado octubre de 2019]. Disponible en: <https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/2018-01-1738/>
- [7] MESA Liber Ramos, *et al.* "Aplicación del Análisis de Componentes Principales en el proceso de fermentación de un anticuerpo monoclonal". Revista Vaccimonitor. 2018, vol.27, n.1. ISSN 1025-028X. Disponible en: <https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/2018-01-1738/>
- [8] LUO L, *et al.* "A regression model for fuel consumption". En Conference: Spokane, Washington, 2017. Disponible en: <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=47925> ; DOI:10.13031/aim.201701626
- [9] SHANE, B. "Utilizing and adapting the Delphi Method for use in qualitative research". International Journal of Qualitative Methods. 2015, vol. 14, n. 5, p. 1-6. Disponible en: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1609406915621381> ; DOI: 10.1177/1609406915621381
- [10] Díaz, A., Del Castillo, A, Villar, L. "Instrumento para evaluar el estado de la gestión de mantenimiento en plantas de bioproductos: Un caso de estudio". *Ingeniare*. 2016. vol. 25, n. 2, p. 306-313. Disponible en: https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-33052017000200306
- [11] LUGHOFFER Edwin. "Predictive Maintenance in Dynamic Systems". 2019. Springer Nature Switzerland AG. ISBN 978-3-030-05644-5. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-05645-2>
- [12] SHAPPEE Mahmood, John Dalsgaard Sorensen. "Maintenance Optimization and Inspection Planning of Wind Energy Assets: Models, Methods and Strategies". Reliability Engineer-and System Safety. 2017, vol. 192. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095183201630789X> ; doi: 10.1016/j.res.2017.10.025
- [13] KILÉ Pedro Álvarez, *et al.* "Causas de la desviación del índice de consumo de combustible en los generadores eléctricos Hyundai". 2020, vol. 41, n. 2, mayo/agosto. ISSN: 1815-5901. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59012020000200008

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Rasvel Aliaga Naranjo: <https://orcid.org/0000-0003-1032-4001>

Diseño de la investigación, recolección de los datos, implementación de los modelos, análisis de los resultados, redacción del borrador del artículo, la revisión crítica de su contenido y en la aprobación final.

Francisco de la Torre Silva: <https://orcid.org/0000-0003-1032-4001>

Diseño de la investigación, recolección de los datos, implementación de los modelos, análisis de los resultados, redacción del borrador del artículo, la revisión crítica de su contenido y en la aprobación final.

Ángel Rodríguez Soto: <https://orcid.org/0000-0002-5512-9288>

Diseño de la investigación, análisis de los resultados, redacción del borrador del artículo, la revisión crítica de su contenido y en la aprobación final.

Joel Guillén García: <https://orcid.org/0000-0002-5714-2400>

Diseño de la investigación, análisis de los resultados, redacción del borrador del artículo, la revisión crítica de su contenido y en la aprobación final.