

45

Fecha de presentación: julio, 2020
Fecha de aceptación: septiembre, 2020
Fecha de publicación: octubre, 2020

PERFECCIONAMIENTO

DE LOS ESQUEMAS DE ANÁLISIS Y MÉTODOS DE CÁLCULO DE LOS ELEMENTOS DE MÁQUINAS Y EQUIPOS, UN PASO DE AVANCE EN EL DESARROLLO DE LA COMPLEJIDAD DE LA CIENCIA

PERFECTING THE ANALYSIS SCHEMES AND CALCULATION METHODS OF MACHINE AND EQUIPMENT ELEMENTS, A STEP FORWARD IN THE DEVELOPMENT OF THE COMPLEXITY OF SCIENCE

Juan Gabriel Noa Águila¹

E-mail: jnoa@ucf.edu.cu

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9968-120X>

Sergio Montelíer Hernández¹

E-mail: smonte@ucf.edu.cu

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0042-0454>

Ángel Rafael Martínez León²

E-mail: angelmartinezleon76@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5181-888X>

¹ Universidad de Cienfuegos “Carlos Rafael Rodríguez. Cuba.

² Empresa de productos lácteos Escambray. Cumanayagua. Cienfuegos. Cuba.

Cita sugerida (APA, séptima edición)

Noa Águila, J. G., Montelíer Hernández, S., & Martínez León, A. R. (2020). Perfeccionamiento de los esquemas de análisis y métodos de cálculo de los elementos de máquinas y equipos, un paso de avance en el desarrollo de la complejidad de la ciencia. *Revista Universidad y Sociedad*, 12(S1), 338-345.

RESUMEN

El presente trabajo consta de una recopilación de las principales investigaciones desarrolladas por el colectivo de mecánica aplicada de la universidad, consolidados en tesis doctorales, y de maestrías en esta área del conocimiento, basados en el perfeccionamiento de los esquemas de análisis y los métodos de cálculo de los elementos de máquinas y equipos, resultado que mereció el Premio Anual de Investigación de la Academia de Ciencias de Cuba. Constituye, además, un paso de avance en el desarrollo de la complejidad de la ciencia. Se realiza una recopilación de diferentes fuentes de Internet sobre la Teoría de la Complejidad hecha desde una visión Ciencia Tecnología y Sociedad (CTS) y desde su evolución histórica en el seno de diferentes ciencias hasta constituirse como una ciencia, con personalidad propia y aspiraciones de convertirse en una rama destacada de la ciencia en el actual siglo XXI.

Palabras clave: Complejidad, esquemas de análisis, elementos de máquinas.

ABSTRACT

The present work consists of a compilation of the main investigations developed by the university's applied mechanics collective, consolidated in doctoral theses, and master's degrees in this area of knowledge, based on the improvement of the analysis schemes and calculation methods of the elements of machines and equipment, a result that deserved the Annual Research Prize of the Cuban Academy of Sciences. It also constitutes a step forward in the development of the complexity of science. A compilation of different Internet sources is made on the Complexity Theory made from a Science Technology and Society (STS) vision and from its historical evolution within different sciences until becoming a science, with its own personality and aspirations to become in a prominent branch of science in the current 21st century.

Keywords: Complexity, analysis schemes, machine elements.

INTRODUCCIÓN

La ciencia moderna ha alcanzado hasta el momento éxitos notables a la hora de explicar el mundo mediante la técnica del reduccionismo, es decir, en primer lugar, descomponiéndolo en sus elementos constituyentes y a continuación analizando sus propiedades y finalmente reconstruyendo el sistema completo mediante la superposición de sus elementos. Esta metodología se basa en la creencia de la ciencia moderna de que la naturaleza se gobierna por reglas sencillas, de tal modo que el conocimiento y posterior comprensión de estas reglas constituirían precisamente la finalidad de la ciencia.

Además, este enfoque reduccionista lleva consigo una profunda relación con la teoría lineal, que asimismo constituye otro de los pilares en los que se apoya la ciencia e ingeniería de hoy día. Y esto ocurre así debido a que en la teoría lineal se cumple el principio de superposición, que viene a significar en pocas palabras que la suma de las soluciones de un problema es también una solución, sin embargo, ciertos fenómenos en la naturaleza emergen únicamente cuando los elementos constituyentes están conectados formando sistemas más complejos, poseyendo además propiedades que los propios elementos carecen. Existen nuevas tendencias en la ciencia moderna que han tomado el reto de examinar estas propiedades con una aproximación más allá de la reduccionista. Esto es lo que se llama Ciencia de la Complejidad.

Hace más de veinte años se comenzó a hablar de la complejidad. Según Sanjuán (2003), en ese entonces se suponía que las cosas, a pesar de resultar difíciles, eran por sí mismas sencillas y el reto parecía ser el estudio de los sistemas complejos, cuyo estudio además se escapaba del marco de la ciencia conocida. Adentrarse en el mundo de los sistemas complejos era algo así como entrar más allá de la frontera donde comienza lo desconocido. Hoy en día se habla de complejidad tanto de las ciencias en sí, como dentro de sí, lo mismo en las ciencias naturales como en las ciencias sociales, y por ende en la ingeniería y en las tecnologías de la información. Se escucha hablar de la Ciencia, la Tecnología e incluso de la Ingeniería de la Complejidad, siendo un problema definir lo que es complejidad y encontrar una definición que sea del gusto de todos resulta arduo. Parece convertirse pues en un término que se escapa de las manos, tal como expresa Sanjuán, *“como un pez recién sacado del agua al que no somos capaces de atrapa”*.

El estudio de la complejidad *en* la ciencia, como se verá en el presente trabajo, conduce de modo natural a lo que se conoce como la Ciencia de la Complejidad. La ciencia moderna marcha en esta dirección y las Ciencias Técnicas

no pueden marchar en la dirección contraria. Hasta hace unas pocas décadas se justificaba la simplificación, no existía el desarrollo que tiene hoy en día la computación, nada justifica este enfoque, es una necesidad emplear cada día esquemas de análisis y métodos de cálculo que se ajusten mejor a los sistemas reales.

EL colectivo de la Línea de Investigación de Mecánica Aplicada de la Universidad de Cienfuegos, Cuba ha dado pasos de avance en el: Perfeccionamiento de los esquemas de análisis y los métodos de cálculo de los elementos de máquinas y equipos (Goytisoló & Noa, 2005).

DESARROLLO

Muchos de los esquemas de análisis y de los métodos que se han empleado históricamente en el cálculo de los elementos de máquinas y equipos son susceptibles de perfeccionamiento, algunos de ellos hay que reconocer no habían sufrido cambios en los últimos 50 años o más. El surgimiento y desarrollo de una nueva rama de la Mecánica de Materiales en los últimos 40 años: la Mecánica de la Fractura, ha planteado una nueva necesidad, la de pronosticar los plazos de desarrollo de los microdefectos o microgrietas que puedan existir dentro de la estructura metalográfica de los metales en presencia de cargas cíclicas, o la de predecir cuáles son las dimensiones límites de estos defectos para los cuales se produciría la destrucción de los elementos en condiciones de cargas estáticas. Para esto se requiere mejorar los métodos de cálculo de las tensiones y muchos de los esquemas de análisis empleados hasta la fecha que no permiten satisfacer esta necesidad.

En las Ciencias Básicas se ha desarrollado un concepto de complejidad asociado a la Física, aunque muy cercano en cuanto a la temática con problemas de ciencias de la vida, la economía y en general fenómenos que se describen con muchos grados de libertad o con muchas variables. Algunos de los ingredientes básicos son la dinámica no lineal y la teoría del caos determinista, la geometría fractal, la dinámica estocástica, las series temporales no lineales, las redes complejas y los fenómenos colectivos. Se asume que la ciencia de la complejidad tiene mucho que ver con las conexiones y las múltiples interacciones entre las diferentes disciplinas científicas de forma que su desarrollo podría permitir conocer espacios nuevos y aplicaciones nuevas en un futuro próximo.

El mundo en que vivimos es muy complejo y constituye un enorme reto comprender la naturaleza fundamental de sus complejidades. La naturaleza está llena de formas geométricas complejas tales como las líneas de las costas, estructuras de los ríos, las formas biológicas e incluso

las curvas complejas de los mercados financieros. Existe una característica común en tales formas complejas, que es la autosemejanza. Esta es la propiedad que consiste en que cuando una parte de cierta forma se aumenta aparece el mismo tipo de estructura. Esta propiedad fue descubierta por Benoit Mandelbrot y es una propiedad universal que poseen muchas formas geométricas complejas y que denominó "fractal". Por otro lado, existen numerosos patrones dinámicos en la naturaleza tales como el movimiento de los planetas, la turbulencia en el agua y en el aire, variaciones de las poblaciones de las especies en sistemas ecológicos y otros muchos ejemplos. Estos patrones se describen mediante ecuaciones de evolución no lineales y James Yorke encontró el mecanismo universal que subyace a estos fenómenos no lineales, lo llamó "caos", y a lo largo de décadas ha intentado descubrir y enunciar sus propiedades matemáticas. Ambos investigadores encontraron que los "fractales" y el "caos" son estructuras universales que se encuentran en los sistemas complejos.

Para comprender la esencia de la Ciencia de la Complejidad es necesario conocer como evolucionaron a lo largo de la historia los conceptos en la Física y como estos conceptos condujeron a lo que fue el embrión de lo que hoy se conoce como Ciencia de la Complejidad, al mismo tiempo se verá como estos conceptos se pueden extrapolar a otras ciencias. En este desarrollo, ha estado siempre presente el principio de causalidad: las mismas causas producen siempre los mismos efectos. Esto ha llevado al pensamiento filosófico de que dadas unas condiciones de contorno de un sistema es posible determinar la evolución futura de éste.

En general, los modelos físicos se basan en unas leyes simples que encierran y explican, de forma global, un determinado comportamiento de la naturaleza. Nuestra propia naturaleza nos muestra una constante incertidumbre sobre el futuro. La Biología, Psicología, Sociología, etc. encuentran, con frecuencia, dificultades para explicar los procesos que estudian, a partir de los elementos componentes (Sauer, 2002).

En general, el comportamiento no determinista de los sistemas se debe a una naturaleza no lineal de las leyes que lo controlan. Un ejemplo son las ecuaciones de la dinámica de fluidos conocidas con el nombre de Navier - Stokes. A lo largo de los siglos XVIII y XIX, el avance de la Física y las Matemáticas se fundamentó principalmente en el estudio de sistemas lineales, ya que tienen un tratamiento relativamente sencillo y conducen a resultados predecibles, a partir de unas condiciones iniciales. Los mayores exponentes de este desarrollo fueron Laplace y Fourier. Una excepción son las ecuaciones antes mencionadas,

que fueron inicialmente propuestas por Euler para fluidos no viscosos y completadas por Navier y Stokes para fluidos viscosos.

A finales del siglo XIX, Poincaré estudió el movimiento de los planetas en un entorno complejo y concluyó que "puede ocurrir que pequeñas diferencias en las condiciones iniciales produzcan otras muy grandes en el fenómeno final; un pequeño error al comienzo produce un error enorme al final; la predicción es imposible". El propio Poincaré demostró de forma concluyente que ciertos sistemas mecánicos pueden desarrollar un comportamiento caótico, lo que le llevó a afirmar que "el determinismo es una fantasía de Laplace".

A mediados del siglo XIX, Boltzmann estableció las bases teóricas de la Física Estadística. La conclusión a la que llegó Boltzmann es que la entropía del sistema, definida por el segundo principio de termodinámica, es una consecuencia directa de la distribución de probabilidades del estado del sistema, de tal forma que el estado más probable es aquel que tiene una entropía mayor. Con esto quedó demostrado formalmente un principio definido con anterioridad de forma empírica, que establece que la dinámica de un sistema de partículas sin estructura tiende hacia un estado en el que la entropía es máxima y en el que la temperatura de las partículas es homogénea y, por tanto, incapaz de realizar ningún trabajo. Este razonamiento conduce al pronóstico de la muerte térmica del universo.

La Mecánica Estadística, sobre todo, la Mecánica Cuántica introducen el concepto de probabilidad, por lo que, de alguna manera, se reconoce que los procesos físicos están controlados por el azar. Lo más chocante es que este control determina efectos macroscópicos de primer orden. Esto choca frontalmente con el concepto de procesos deterministas.

Sin embargo, a medida que la teoría cuántica avanzó a principios del siglo XX, el hecho estocástico se fue haciendo más patente, lo que ha supuesto un fuerte cambio de mentalidad. Un ejemplo de ello fue la posición de Einstein frente a la teoría cuántica. Era un determinista profundo que, al principio, participó en el desarrollo del concepto cuántico.

Redondo (2013), analiza el fenómeno de la complejidad, desde la visión del movimiento como forma de existencia de la materia y del pensamiento. Plantea que si se observa la materia en sus manifestaciones exteriores, a veces puede parecer estática, pero incluso en ese momento, las partículas que la integran se hallan en continuo movimiento. Hay situaciones en las que se puede predecir con seguridad lo que va a suceder de inmediato, incluso

a mediano y largo plazo. Esto ocurre en la naturaleza y en la sociedad, como su parte más avanzada. Así si un alumno estudia, es seguro que aprobará, si no lo hiciera, también el resultado es previsible. No obstante, la calificación que obtenga en el primer caso, obedece a la ley de la probabilidad. Pero si aparece un factor inesperado, que lo altera todo, entonces se produce el caos, ¿qué pasará? No es posible valerse del determinismo ni del probabilismo. Por otra parte, dado el elevado nivel de abstracción alcanzado por las matemáticas, es posible que reflejen estructuras que todavía no poseen vigencia en el mundo real. De aquí que si se refleja un fenómeno, natural o social, en un sistema de ecuaciones diferenciales, al introducir este en una computadora y dejar que se produzca la secuencia de pasos que habrán de llevarle a su solución, puede suceder que se rebasen los límites preconcebidos y exprese situaciones desconocidas hasta entonces, cuyos protagonistas son factores internos y externos del hecho de que se trate entre ellos, con frecuencia apreciable, los hay inesperados, al menos su comportamiento es inesperado.

Actualmente las realidades son más complejas, en las que existen una gran variedad de fenómenos complejos no lineales en sistemas tanto naturales como artificiales, y que se pueden reducir a reglas sencillas. Además, fruto de la aparición y emergencia de nuevos conceptos no lineales como el “caos” y los “fractales”, está llegando a ser obvio que una aproximación lineal no resulta de utilidad en la descripción de algunos sistemas dinámicos complejos. Se trata en último término en intentar armonizar la ciencia y la ingeniería con la finalidad de crear una nueva disciplina de la ciencia e ingeniería de la complejidad y dentro de este empeño encontrar la Unidad de la Ciencia, tal como se plantea Riofrío Ríos (2003).

Hasta el presente se han atacado problemas esenciales e importantes usando dos enfoques básicos. Por un lado, se podría hablar del enfoque experimental – observacional de los sistemas complejos del mundo real, entre los que cabría mencionar el cerebro, la tierra y los planetas, el genoma, los fluidos y los plasmas. Por otro lado, se habla del enfoque teórico - computacional, en los que se usaría una modelización no lineal, caos determinista, computación de altas prestaciones, control de sistemas, minería de datos y diversas técnicas de computación y visualización científica (Riofrío, 2019).

En este sentido el célebre físico inglés Stephen Hawkins, famoso por sus teorías sobre los agujeros negros, en una entrevista que concedió al periódico norteamericano Mercury News el 23 de enero de 2000, al referirse al siglo XXI, predijo: “Creo que el próximo siglo será el siglo de la complejidad”. La ciencia moderna marcha en esta

dirección, las Ciencias Técnicas no pueden marchar en la dirección contraria. Hasta hace unas pocas décadas se justificaba la simplificación, no existía el desarrollo que tiene hoy en día la computación, hoy nada justifica este enfoque, es una necesidad emplear cada día esquemas de análisis y métodos de cálculo que se ajusten mejor a los sistemas reales (Chase, 2000).

Hacia esta nueva era del conocimiento el colectivo de la Línea de Investigación de Mecánica Aplicada de la Universidad de Cienfuegos, Cuba ha dado pasos de avance en el: Perfeccionamiento de los esquemas de análisis y los métodos de cálculo de los elementos de máquinas y equipos,

El desarrollo de nuevas y potentes herramientas para la Ingeniería en general y para la mecánica en particular como son los software: Mechanical Destok, EXCEL, Mathematika, SPSS 11.0 y otros, el desarrollo que ha sufrido el Método de los Elementos Finitos en los últimos 20 años, método numérico este que permite calcular tensiones en los elementos de máquinas, equipos y estructuras con una gran exactitud, dado los software profesionales que ya existen, han propiciado las condiciones para poder perfeccionar estos esquemas de análisis y métodos de cálculo.

En el caso de las uniones de elementos de máquinas hay que decir que: los métodos de cálculo de las uniones soldadas, por ejemplo, han sido la cenicienta de los elementos de máquinas, ningún autor se ha preocupado por calcular las tensiones máximas locales que aparecen en los extremos de los cordones de las uniones con costuras de filete longitudinal y transversal, en las cuales los propios autores estudiados reconocen que sus magnitudes son del orden de 9 veces o más las tensiones medias, y sin embargo, se emplea desde hace 100 años un método de cálculo basado en las tensiones medias, método este adecuado para cálculo de cargas estáticas, pero absolutamente insuficiente para realizar valoraciones de resistencia y pronóstico en el desarrollo de cordones de uniones en condiciones de cargas cíclicas aplicando la tecnología de la mecánica de la fractura.

Esto ha llevado a pensar que la soldadura es un método de unión muy deficiente para elementos que trabajen en condiciones de cargas cíclicas, sin detenerse a pensar que, por ejemplo, los árboles son elementos de máquinas en los cuales la variación cíclica de las tensiones se produce a una frecuencia de miles de ciclos por segundo y sin embargo pueden ser adecuadamente calculados e impedir su falla por fatiga. Según Hernán Hernández los métodos empleados en la actualidad para el cálculo

de las tensiones en las uniones soldadas no son los más adecuados.

Por otro lado, en muchas uniones soldadas los cordones de soldadura constituyen contornos de paredes delgadas y en el cálculo de las tensiones no se aplica la Teoría de los Perfiles de Paredes Delgadas. Por suerte existen hoy en día potentes software de Elementos Finitos, que permitieron validar las nuevas expresiones de cálculo obtenidas, sin necesidad de realizar complicados experimentos (Hernández, 2006).

En otras uniones como es, por ejemplo, el remachado de embutido, por su condición de nuevo método de unión entre láminas, el esquema de análisis y el método de cálculo simplemente no se había creado, constituyendo un paso de avance en el desarrollo de esta tecnología (González, 2006).

En el caso de los árboles estriados, históricamente, el cálculo fundamental se ha realizado a las presiones de contacto que se produce entre los dientes del estriado del eje y del cubo provocado por el torque que debe transmitir la unión, sin considerar las presiones de contacto provocadas por la carga transversal, presente en la totalidad de los elementos de transmisión de potencia y por la excentricidad de la carga.

A través de toda la historia del cálculo de los árboles de los molinos de caña se ha considerado las chumaceras de los molinos como puntos de apoyo y la fuerza ejercida por la caña sobre el árbol como una de las cargas aplicadas al mismo. En la realidad las chumaceras no son apoyos, sino puntos de aplicación de la fuerza hidráulica total sobre los árboles, iguales entre si en los molinos actuales, el verdadero apoyo del árbol es la propia caña y la fuerza ejercida por la caña sobre el árbol es la reacción de apoyo cuyo carácter de distribución se desconocía y que fue obtenida por primera vez en la práctica con el esquema de análisis elaborado que consiste en considerar el árbol apoyado sobre una fundación elástica que es la caña, cuya constante de rigidez fue obtenida experimentalmente por Arzola (2003).

Este resultado permitió obtener los pronósticos de desarrollo de posibles grietas en dichos árboles aplicando la Mecánica de la Fractura. En Investigaciones realizadas por el colectivo de mecánica aplicada se obtuvieron los fundamentos mecánicos y matemáticos que establecen los requerimientos del cálculo de las presiones hidráulicas que es necesario aplicar a cada una de las chumaceras para elevar la eficiencia en la extracción de jugo de los molinos de caña de azúcar con el empleo de presiones hidráulicas diferentes a ambos lados. Existe en algunos ingenios del país la experiencia de haber molido

con presiones hidráulicas diferentes, para equilibrar el molino y elevar la extracción. Sin realizar los cálculos que permite elaborar el modelo, es imposible precisar la relación de presiones hidráulicas necesarias y puede desequilibrarse hacia el lado contrario.

Además, el criterio de emplear presiones hidráulicas diferentes puede encontrarse en algunos textos especializados sobre el tema, pero el fenómeno solo ha sido estudiado de un modo empírico y descriptivo. Con este trabajo se demuestra que existe una relación de presiones hidráulicas que es la mejor desde el punto de vista de alcanzar la mayor extracción del jugo, la cual es particular para cada molino en dependencia del sistema de cargas que actúe, su geometría y otros parámetros de operación, de ajuste y constructivos. De acuerdo con el modelo descrito se puede lograr un aumento en la extracción hasta del 1 % lo cual es muy significativo si se tiene en cuenta el volumen de azúcar adicional que puede producirse y que se logra sin una variación de la potencia consumida por el molino (Noa, 2005).

Otro aspecto investigado es que los soportes de máquinas y de las estructuras han sido idealizados históricamente a través de tres esquemas de análisis típicos que son: el Apoyo Articulado Móvil, el Apoyo Articulado Fijo y el Apoyo Empotrado. Sin embargo, estos apoyos idealizados se alejan de la realidad, puestos que los Apoyos Articulados implican en los elementos fuerzas internas, flechas y pendientes mucho mayores que las reales, mientras que los Apoyos Empotrados, implican por el contrario fuerzas internas, tensiones, flechas y pendientes mucho menores que las que existen en la realidad. Estas diferencias son contempladas normalmente en el factor de seguridad el cual ha asimilado históricamente las incertidumbres y las inexactitudes de los cálculos.

Hidalgo (2009), describe, en primer lugar, el procedimiento para la construcción de los diagramas de momentos flectores en árboles con apoyos que tienen una rigidez intermedia entre el empotramiento rígido y la articulación pura, denominados en el trabajo: Empotramientos Elásticos. Se realiza además una investigación para la determinación experimental del coeficiente de rigidez de los apoyos en árboles con diferentes tipos de cojinetes de rodamiento comparando el mismo con los casos idealizados de apoyos la articulación y el empotramiento. De estos experimentos se obtienen los valores del coeficiente de rigidez de los cojinetes de rodamientos reales considerados como Empotramientos Elásticos.

En el campo de los engranajes cilíndricos de dientes rectos el colectivo ha trabajado durante muchos años y se destacan los aportes en general vinculados con el

empleo de la corrección del dentado en el cálculo y en el mejoramiento de la resistencia de estos elementos de máquinas. Por su trascendencia y originalidad se han incluido solamente los dos últimos trabajos realizados, como una consecuencia lógica de muchos años en el cálculo de estos elementos, que son un nuevo esquema de análisis y un nuevo modelo matemático para el cálculo del factor de forma de los dientes contemplando no sólo el coeficiente de corrección del dentado, sino también el coeficiente de fricción.

Este resultado modifica por completo los criterios de selección de la corrección del dentado para máxima resistencia a la fractura, no solo en los engranajes cilíndricos de dientes rectos, sino también en los engranajes oblicuos, cónicos e incluso en las transmisiones por tornillo sinfín, empleándose para el cálculo el mismo factor de forma que en los cilíndricos de dientes rectos. Modifica también el concepto de que en una transmisión por engranajes la rueda de menor número de dientes es siempre la más débil, pues puede suceder que en una transmisión multiplicadora, la rueda conductora de mayor número de dientes sea la más débil por el efecto desfavorable que introduce el coeficiente de fricción en el factor de forma del dentado en la rueda conductora y favorable en la conducida.

Uno de los trabajos realizados en el perfeccionamiento en general del cálculo de elementos de máquinas consiste en una nueva formulación matemática de la condición de resistencia según la Teoría de los Estados Tensionales Límites de Mohr, que implica una reducción del error de los pronósticos de resistencia para piezas que están sometidas a estados tensionales mixtos, en particular, para el estado tensional de cortante puro, se reduce teóricamente el error de los pronósticos para materiales dúctiles de un 15 % a cero y para los frágiles desde un 23 % o más a cero, esto constituye la ruptura de convencionalismos existentes en la literatura (Goytisolo, 2004).

En los cojinetes de deslizamiento se presenta un aporte en el cual se elaboró una metodología para el cálculo de cojinetes hidrostáticos para resolver una necesidad de unos cojinetes de este tipo en la Empresa de Cemento "Karl Marx" de Cienfuegos, dicha metodología no existía anteriormente y la existente no resolvía la problemática tan compleja que se presentó.

En el desarrollo de los esquemas de análisis y los métodos de cálculo de los cilindros hidráulicos desarrollados por integrante del Centro de Estudios de la Oleohidráulica y de la Neumática, ha trabajado durante muchos años, desarrollando los métodos de cálculo para lograr evaluar la posible pérdida de la estabilidad de los mismos, y para

optimizar las dimensiones radiales del cuerpo. Los cilindros hidráulicos constituyen un elemento comprimido de dos tramos de diferente rigidez, en el caso más simple.

Las condiciones de apoyo pueden ser muy diversas, desde el caso de apoyos articulados en ambos extremos hasta el caso de un apoyo empotrado y el otro articulado, ambos apoyos empotrados o también alguno de los apoyos no tiene que estar en los entremos. Los cilindros hidráulicos excepcionalmente trabajan todo el tiempo en posición vertical, lo más común es que ocupen posiciones inclinadas o en algunos casos una posición completamente horizontal; esto implica que el peso propio del cilindro y el del líquido hidráulico constituyen, en estas condiciones, una carga transversal que empeora las condiciones para la posible pérdida de la estabilidad. En las uniones deslizantes de los cilindros hidráulicos como son: el par de deslizamiento pistón – cuerpo del cilindro y la unión vástago – buje guía, existen holguras y en ellas existen elementos elásticos como son los sellos, de manera que en la realidad estas condiciones hacen que la línea elástica de un cilindro hidráulico, en condiciones de pérdida de la estabilidad del equilibrio, no es una función continua sino una línea quebrada, elemento este que complica cualquier análisis de estabilidad en estos elementos.

Se elaboró un nuevo esquema de análisis y un nuevo modelo matemático para realizar los cálculos de estabilidad en cilindros hidráulicos de simple etapa que a diferencia de todos los modelos y métodos existentes utilizados en la actualidad, permite tomar en cuenta los aspectos fundamentales mencionados, en la pérdida de la estabilidad de estos elementos. El modelo fue validado en una instalación experimental, montada con ese fin en la Empresa Oleohidráulica de Cienfuegos, en un cilindro colocado horizontalmente, bajo la influencia de su peso, las holguras existentes y para varios valores de carga axial, obteniéndose un error promedio del modelo con relación a los resultados experimentales inferior al 10% (Gómez, 2004).

Se presenta también un método para optimizar multicriterialmente las dimensiones del cuerpo del cilindro hidráulico en la dirección radial de manera que se garantice mínimo peso y adecuadas resistencias a la explosión y rigidez radial del cilindro y por lo tanto una adecuada hermeticidad. Se propone una metodología práctica para la selección de las dimensiones radiales de los cilindros hidráulicos en dependencia del material con que se fabrique el mismo, con este fin se elaboró una familia de curvas para la selección de la relación óptima de los diámetros de la camisa de los cilindros hidráulicos en dependencia de las propiedades mecánicas del material.

Una avería no frecuente en equipos es la pérdida de la estabilidad del equilibrio del cuerpo en el caso de los Generadores de Escama de Hielo. Fue necesario elaborar una nueva metodología para evaluar la posibilidad de surgimiento de esta avería en estos equipos tomando en cuenta no sólo la presión exterior sobre el cuerpo, sino también la diferencia de temperatura obligatoriamente presente entre el borde interior y exterior de la pared y los posibles pequeños errores de ovalidad producidos durante la fabricación o el montaje que no se tiene en cuenta.

Una vía poco explotada para el ahorro de energía es la elevación del rendimiento mecánico. Se realiza un análisis y su incidencia en el gasto energético de las industrias de proceso continuo, como elemento poco explotado en la reducción del consumo de energía e indirectamente en la elevación de la sostenibilidad de los procesos industriales y en la conservación del medio ambiente. Además se analizan algunos ejemplos prácticos resultado del Trabajo Científico del Colectivo de Mecánica Aplicada de la UCf, empleados en la docencia de la asignatura Elementos de Máquinas de la Carrera de Ingeniería Mecánica, la magnitud de los ahorros que se pueden lograr mediante el mejoramiento, por distintas vías, del rendimiento mecánico de la transmisión de potencia, los cuales contribuyen a la creación de la conciencia en la educación sobre la sostenibilidad energética y medio ambiental de los procesos industriales. (Goytisoló & Noa, 2008).

Como se puede ver se han dado pasos de avance en este sentido, a pesar de las dificultades y los dogmas existentes, con los cuales muchos de estos esquemas de análisis rompen, obteniendo resultados veraces con menor nivel de incertidumbre.

CONCLUSIONES

El perfeccionamiento de los esquemas de análisis y de los métodos de cálculo de los elementos de máquinas y equipos desarrollado por el equipo de Investigación de Mecánica Aplicada de la Universidad de Cienfuegos, obteniendo dos premios de la Academia de Ciencias de Cuba enfocado en este sentido, ha constituido un paso de avance en el desarrollo de la Complejidad de la Ciencia.

La Ciencia de la Complejidad es una disciplina que suministra nuevas perspectivas y conocimientos en como la naturaleza y los seres vivos se auto-organizan, evolucionan y se adaptan como resultado de procesos de cooperación e interacciones mutuas entre los elementos que los constituyen.

Representa un reto y una revolución intelectual que está transformando nuestra comprensión de la naturaleza, la

vida biológica, sus estructuras y funciones. Entre sus líderes se encuentran prestigiosos biólogos, físicos, psicólogos sociales, economistas, matemáticos, y neurocientíficos de todo el mundo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arzola, N. (2003). *Esquema de análisis de los árboles de los molinos de caña de azúcar y aplicación de la Mecánica de la Fractura en la determinación del período entre inspecciones*. (Tesis doctoral). Universidad de Cienfuegos.
- Chase, N. (2000). Entrevista a Stephen Hawking. *Mercury News*.
- Gómez, V. (2004). *Metodologías de cálculo para la comprobación de la estabilidad, el diseño del sistema de amortiguación y la optimización de las dimensiones radiales del cuerpo de los cilindros oleohidráulicos*. (Tesis doctoral). Universidad de Cienfuegos.
- González, F. (2006). *Evaluación de la Resistencia Mecánica de la Uniones por Remachado de Embutido*. (Tesis doctoral). Universidad de Cienfuegos.
- Goytisoló, R. & Noa, J.G. (2005). Aportes Científicos en el Perfeccionamiento de Los Esquemas de Análisis y los Métodos de Cálculo de los Elementos de Máquinas y Equipos. Academia de Ciencias de Cuba.
- Goytisoló, R. (2004). *Una formulación más exacta de la Condición de Resistencia según la Teoría de los Estados Tensionales Límites de Mohr* (Ponencia). Congreso de Ingeniería Mecánica COMEC 2004. Santa Clara, Cuba.
- Goytisoló, R., & Noa, J. G. (2008). Gestión de Vida: Aportes Teóricos y Prácticos en su Aplicación al Análisis y Solución de Averías en Sistemas Mecánicos. Estudio de Casos. Academia de Ciencias de Cuba.
- Hernández, H. (2006). *Desarrollo y perfeccionamiento de las expresiones para el cálculo de las tensiones máximas en las uniones soldadas con costuras de filete*. (Tesis doctoral). Universidad de Cienfuegos.
- Hidalgo, C. (2009). *Estudio teórico y experimental del coeficiente de rigidez de los apoyos en árboles con diferentes tipos de cojinetes de rodamientos*. (Tesis de maestría). Universidad de Cienfuegos.
- Noa, J. G. (2005). *Aplicación de la Mecánica de la Fractura en la elevación de la resistencia a la fatiga y en la vida residual de los árboles superiores de los molinos de caña de azúcar*. (Tesis de maestría). Universidad de Cienfuegos.

- Redondo, L. (2019, 25 julio). *Alcance de la Teoría de la Complejidad*. Cuba Siglo XXI. http://www.nodo50.org/cubasioXXI/politica/redondo5_310802.htm
- Riofrio, W. (2019). Towards the Design of Molecular Signaling Networks Devices. En, M. Burgin, & G. Dodig-Crnkovic (eds.), *Theoretical Information Studies, Part 3*. World Scientific.
- Sanjuán, M. (2003). La Complejidad en la Ciencia. *Gaceta de la Real Sociedad Matemática Española*, 1(6).
- Sauer, T. (2002). Ciencia de la complejidad, evolución. *Journal of Statistical Physics*, 65(3).