

ANÁLISIS DE MODELOS MATEMÁTICOS PARA ELECTROIMANES INDUSTRIALES

Data de submissão: 02/01/2024

Data de aceite: 02/01/2024

Nestor Antonio Flores Martínez

Universidad Metropolitana de Monterrey
Guadalupe, Nuevo León, México

Valentín Guzmán Ramos

Universidad Tecnológica General Mariano
Escobedo
Escobedo, Nuevo León, México

Ricardo Chapa García

Universidad Tecnológica General Mariano
Escobedo
Escobedo, Nuevo León, México

RESUMEN: Se presentan de forma descriptiva, las irregularidades en modelos matemáticos y de ingeniería, orientados a sistemas industriales. Desarrollando un estudio matemático de cuales son los alcances y complicaciones que estos pueden tener. Describiendo los requerimientos de un sistema predictivo en la industria, como las complicaciones generadas por desconfianza de los directivos de estas. Una comparativa entre diferentes modelos con respecto a los datos registrados, además de complicaciones entre las pruebas experimentales y sus predicciones. Se termina con un análisis

sobre las deficiencias de la industria con respecto al rechazo de la ciencia y modelos parametrizados.

PALABRAS CLAVE: campo magnético; dinámica de fluidos; industria; ingeniería inversa; conductores eléctricos; leyes de Newton.

ABSTRACT: A brief description about how math and engineering models have irregularities due to industry applications and conditions for production line. Development of a mathematical study for the determination of the reaches and its possible complications. How predictive modeling for industry is possible under the permission of the companies' directors. A data comparison according to recorded data from real equipment with different math formulas and equations. Possible mistakes from experimental data to math predictions. At the end, there is a short analysis about how some factories cannot improve their productions with the rejection of science and engineering applications.

KEYWORDS: magnetic field; fluid dynamics; industry; reverse engineering; wires; Newton's laws.

1 | INTRODUCCIÓN

En la ciencia se establece la teoría que describe los fenómenos de la naturaleza, desarrollando modelos matemáticos, descubriendo sus límites y alcances. La ingeniería se especializa en generar aplicaciones de estos. Las industrias hacen realidad esos diseños, modelos, teorías y cálculos especializados. Ponen a prueba el entendimiento de científicos e ingenieros, desarrollando tecnología y equipamiento que en ocasiones son consideradas imposibles, complicadas o de altos costos.

Es una trayectoria de desarrollo que implica una simplificación con complejidad por debajo de los modelos de juguete. Conectar la teoría con los diseños y la aplicación se complica dada su necesidad de una producción en poco tiempo con un presupuesto reducido para maximizar las ganancias.

Los especialistas deben interactuar entre ellos, para tener conocimiento de la aplicación en industria, fabricación, desarrollando modelos que sean simples de entender para gente sin capacitación, bajo condición de un determinado nivel de precisión y exactitud para los experimentos en campo. Este trabajo pretende dar un paso al frente en dicha colaboración, para establecer modelos matemáticos que tengan aplicación directa, sin modificaciones o aproximaciones nuevas, que predigan el sistema industrial o tecnológico en que será usado.

En específico, el análisis de ciertos elementos implementados en el diseño, construcción y prueba de electroimanes de grado industrial, sobre características que determinan su resistencia, capacidad de carga y algunos elementos de ingeniería que son usados como parámetros de su adecuado funcionamiento [Moreau, 1970].

2 | CAMPO MAGNÉTICO COMO UN NUEVO MODELO

Se suelen citar ecuaciones generales de teoría electromagnética para posterior, resolver los casos lineales o reducidos: ecuaciones diferenciales y ecuaciones diferenciales parciales. La resolución de los sistemas originales, requieren de la aplicación de temas primordiales de la física y la matemática como procesos estocásticos, transformadas multivariadas y tensores de rango tres. Se puede construir un punto medio, desarrollando ecuaciones que no tengan sistemas simplificados en sus ecuaciones, con parámetros como funciones de otra variable o relacionadas con ecuaciones en un determinado tiempo i -ésimo.

La coincidencia de los elementos implementados en diferentes teorías de ondas para fenómenos físicos [Andersen, Santos, Fuerts, 2015; Landau, Lifshitz, 1984; Oliveros Mesa, Solarte Blandón, 2012] (termodinámica, electromagnetismo, dinámica de fluidos, información, acústica) implican la posibilidad de ecuaciones generales para describirles. Esto se ha probado con ciertas libertades a través del tensor de deformaciones, establecido (posiblemente) por Robert Hooke.

El campo magnético se comporta como un fluido [Flores Martínez, Guzmán Ramos, Guzmán González, 2022]; tiene resistencia y dirección, además que puede presentar efectos como turbulencia, divergencia y rotacional. Los elementos del campo en un sistema libre implican una extensión hacia el infinito en espacio, pero, un tiempo finito en existencia debido al aumento de la resistencia en un material por el calor del uso constante. Tiene un máximo en la polarización de los dipolos moleculares, que no se conoce a priori. Además de una deformación en el espacio, para diferentes zonas según interactúa con otros campos o con la materia.

Considerando el uso de los electroimanes se comienza analizando la posibilidad de determinar la capacidad de carga, a partir de la interacción del campo con la materia, a partir de su energía potencial (energía magnética debido a los campos en su morfología). Los correspondientes de fuerza, considerando un sistema real de tres dimensiones espaciales, debido al potencial de un imán (o electroimán) Se puede generalizar como una forma simple de la ecuación de deformaciones:

$$\sigma_i = -\frac{\partial V}{\partial x_i} \quad (1)$$

En cuanto a electroimanes, suele referirse a su capacidad de levantar objetos como fuerza de levante (o capacidad de arrastre), un concepto lineal sobre su funcionamiento que es erróneo en su interpretación. Se refiere a una atracción magnética entre un campo magnético y un material ferromagnético, o entre dos materiales ferromagnéticos. Cuando el electroimán, en específico el núcleo magnetizado, interactúa con otros materiales el campo magnético inducido en este interactúa con las partículas del material (o materiales) en contacto, generando también una ligera magnetización en este último, generando atracción mutua. Gracias a una base móvil se desplaza, generando el “levantamiento” como si se produjera una fuerza similar a una grúa.

Se puede conocer la fuerza que el núcleo de una bobina genera a través del campo magnético al que se somete [Baran, 1970; Reitz, Milford, Christy, 2008]. Esta depende del campo inducido (H) en el núcleo por la interacción con el campo envolvente de la bobina. Las ecuaciones empleadas en los solenoides con su caso simple determinan que el campo y por ende la fuerza, dependen del radio de apertura del cuerpo, la permeabilidad del cuerpo y, una relación directa con la corriente y número de vueltas de conductor (solera, alambre o una mezcla de ambos). Considerando la magnetización mutua, se propone una expresión de fuerza que dependa de la proximidad de los cuerpos, en conjunto con el campo del solenoide y el campo inducido en el cuerpo por proximidad. Esto último establece que la limitante de medir la fuerza de un campo se debe exclusivamente a la interacción, y no al campo per se:

$$F \equiv \frac{B_b B_m A}{2\pi\mu_2} = \frac{\mu_0\mu_i N^2 I^2 A}{2\pi r_1 r_2 \mu_1} \quad (2)$$

Las variables y parámetros mostrados en la ecuación (2) corresponden a las propiedades eléctricas y magnéticas del sistema, con factor geométrico sobre la disposición del campo en determinado volumen correspondiente a la dinámica de inducción en el núcleo:

- B_b , el campo magnético inducido en el material por la bobina
- B_m , el campo magnético generado en el núcleo
- A , la zona de contacto, equivalente a la sección transversal del núcleo
- μ_1 , la permeabilidad en el momento del uso de la bobina ya sea al comienzo con poco campo o al final con un gran campo
- μ_2 , la permeabilidad máxima que puede tener el material del núcleo
- μ_p , la permeabilidad del campo sea a bajo campo o alto campo
- r_1 , radio medio de la bobina
- r_2 , radio de la zona de contacto

Por cada conjunto de variables, existe una definición diferente para un factor de proporcionalidad sobre los cambios en la energía cinética y el campo inducido (campo del electroimán en el núcleo). Hay covariantes y contravariantes, dada la dinámica de tiempo y espacio que no ocurren de forma simultánea para los efectos del fenómeno físico. Considerando que hay una variabilidad en el tiempo y espacio, habrá un valor de campo por zonas y tiempos, lo cual puede darnos un campo efectivo propio del sistema:

$$B = \sum_{i=1}^3 B_i = \sum_{i,j}^3 \left\{ \alpha_{ij} \frac{\partial}{\partial x_j} V_i - \alpha_{ij} \frac{\partial}{\partial x^i} V^j \right\} \quad (3)$$

Considerando que unos elementos son covariantes y otros contravariantes, los índices se invierten al evaluar los arcos, el elemento y^{jk} implica rotación de ejes:

$$B_{ij} = \gamma^{jik} \alpha_{ij} \partial_i V_j \quad (4)$$

El campo efectivo será siempre una propiedad causada por la energía potencial. Este y la fuerza son elementos codependientes, lo cual puede observarse en las aplicaciones industriales; el funcionamiento del electroimán en un determinado tiempo depende del tipo de uso en los momentos previos, la distribución del campo en una determinada zona del volumen (interior del núcleo y/o exterior) depende de la fuente como la interferencia con el campo en zonas anexas.

Las ecuaciones determinan codependencias de varios parámetros y variables en la dinámica del campo. Los datos registrados en industria muestran la interacción con

cualquier material, su distribución implica una similitud con la densidad de los fluidos, a lo cual se establece que debe haber una densidad propia del campo magnético y su distribución espacial. Se refleja en una expresión de distribución radial del campo a partir del origen, definido en un parámetro que, para un caso simple es el tiempo lineal periódico:

$$r = \sqrt{(\alpha + a \cos t)^2 + (\beta + b \sin t)^2 + (a \sec t)^2} \quad (5)$$

Dicha expresión depende de ecuaciones paramétricas y la velocidad de onda, la cual se determina a través de la velocidad de grupo de los pulsos magnéticos, que en última instancia está relacionado de forma directa pero implícita con la densidad del medio o de las ondas, como la densidad de un fluido.

Se tienen dos efectos elásticos en los electroimanes, uno generado por el campo dada la permeabilidad del medio, y otro generado por el comportamiento de los materiales de acuerdo con sus propiedades mecano-elásticas. Relacionadas con efectos térmicos de deformación lo cual se debe a un efecto de dilatación en los materiales de la bobina, al ser un sistema encapsulado de varios elementos, hay compresión en diferentes direcciones.

Las fuerzas no están en equilibrio: La carcasa mantiene la forma conforme se desgasta y se lleva la estructura al punto máximo de deformación. Esta reduce la eficiencia en cuanto a la capacidad de carga (kilos que levanta).

Todo cuerpo que se estremece en un medio elástico extenderá el movimiento de las partículas en todas direcciones; pero, en el medio provocará un movimiento tipo circular. La propagación de onda térmica como onda electromagnética se da hacia el exterior en límites geométricos del cuerpo (carcasa), tiene un rotacional con magnitud proporcional a la cantidad de partículas (intensidad de campo) cerca del centro.

La fricción que surge de la falta de lubricidad de las partes del fluido (la viscosidad del medio o en este caso, la interacción por ionización del campo), en igualdad de condiciones, es proporcional a la velocidad con que las partículas se acercan [Butvok, 1973; Gratton, 2002; Aris, 1989]:

$$\mu \propto \sum_{i=1}^n \vec{V}_{a \rightarrow b, i} \quad (6)$$

Los cuerpos son devueltos al mundo (medio) en un vórtice, sus direcciones y posiciones cambian por ser aplastados (impactados) con este, son movidos por la misma dinámica que otras partes (o partículas) en cuanto a velocidad y determinación de una trayectoria curvilínea. Las irregularidades de un medio o material permiten el desplazamiento de las partículas u otro medio que no sea propio para una mezcla química (movimiento de Brown). El ruido de Brown es el responsable del movimiento en un sistema estático, como en un dinámico.

El sistema de la bobina implica una interacción partícula-campo, con lo cual hay

una determinada fricción al movimiento del campo dentro de la carcasa. Si la fricción es proporcional a la velocidad, también al cambio de momento:

$$\mu \propto u_{i,j} \rightarrow \partial_i p_j \quad (7)$$

Con un cambio en la viscosidad, cambia el momento en intensidad y dirección. El formalismo matemático, establece que la viscosidad representa la distribución no homogénea del campo, creando zonas con mayor concentración de campo. Conociendo cuales son las características del material del núcleo o carcasa se determina la distribución del campo. Con ello, se establecen las irregularidades que limitan la expresión de la fuerza.

Se ha usado en ingeniería una ecuación que establece la medición del campo como un valor en weber y variaciones de esto, tal que las unidades no son Tesla ni Gauss. Esta unidad se mide como Newton por cada metro de área. En fábricas donde no se tiene un contexto o información del origen de ecuaciones y formulas, se le llama cantidad de carga. Para empresas que usan/fabrican electroimanes, existe una reducción al absurdo de la expresión de fuerza, aunque con mayor grado de detalle, dependiente del campo estimado, propiedades mecánicas y los factores magnéticos de los materiales:

$$|F| = \frac{k(B_0(r, z))^2}{\mu_0 \pi r^2} \quad (8)$$

3 I EFICIENCIA Y TIEMPO DE TRABAJO

En la sección anterior, se llegó a una expresión que mide la capacidad de carga (fuerza) en proporciones del campo inducido y proporciones geométricas. Dentro de la industria, se determina al campo como un factor de la cantidad de vueltas de conductor (alambre, solera o de otro tipo) por la cantidad de corriente de alimentación (aunque difiera del valor efectivo). Esto último se emplea para otra definición que, en una mala traducción del inglés al español, ha surgido como Ciclo de Trabajo, al menos en Latinoamérica así se le conoce.

De algunos documentos en internet se parte de modelos con simplificaciones para el uso en ingeniería, se tiene que se mide la eficiencia del transporte de corriente eléctrica en los electroimanes a través de un análisis de la corriente esperada en el cable contra la corriente efectiva, lo cual suelen llamar “Ciclo de Trabajo”, representado en forma simple como el corriente de milésimas circulares, con una expresión aproximada:

$$\frac{CM}{10I} \% = CT \quad (9)$$

En ingeniería y ciencias, el ciclo de trabajo está definido como la proporción del tiempo de apagado y encendido de un determinado equipo, relacionado con la cantidad de tiempo que se debe tener en funcionamiento. Se establece por un cálculo similar a

la eficiencia, siendo que dicha propiedad decae en el tiempo debido a la corriente, calor, cantidad de ciclos, vibración, humedad, entre otras cosas. Aunque como concepto, el ciclo de trabajo nos da información de cuánto tiempo puede estar en funcionamiento continuo antes de fallar o que su eficiencia decaiga por debajo del 90%.

Para el diseño y funcionamiento de los electroimanes, la corriente que se usa en el equipo es el indicativo. Midiendo la corriente efectiva durante el encendido, la caída y el valor mínimo que alcanza. Se espera que el valor máximo corresponda a la capacidad indicada en el conductor. Desde la perspectiva teórica, esto corresponde al intercambio de la energía potencial esperada en la capacidad de cada calibre de conductor contra la energía eléctrica generada por la diferencia de potencial:

$$\frac{\text{Energía potencial}}{\text{Energía eléctrica}} = \frac{U}{E} = \frac{2QV}{LI^2} \quad (10)$$

De la definición electrónica de inductancia, $L = \frac{V}{di/dt}$, se tiene una dependencia inversa con la corriente y la diferencia de potencial, que establece una medición de la energía eléctrica. El cociente de la energía corresponde a un valor estático, cuando el conductor no está en uso:

$$\frac{U}{E} = \frac{2QV}{\frac{V}{di/dt}} = \frac{2Q}{I^2} \frac{di}{dt} \quad (11)$$

Cuando el conductor está en uso (el electroimán está en funcionamiento), se tiene una variación de la energía potencial en el tiempo, con un comportamiento cíclico. Una derivada del tiempo o cambio entre dos puntos en el tiempo, para determinar la capacidad de cambio de la energía, en parámetros que miden en industria como corriente, resistencia como algunos otros elementos que son propios de la teoría e ingeniería:

$$\frac{\Delta U}{E} = \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \frac{\pi r^2}{I} + \frac{1}{\pi \epsilon_0} \frac{\partial R}{\partial t} \frac{\partial I}{\partial t} \quad (12)$$

Uno de los elementos corresponde a valores esperados obtenidos para el ciclo de trabajo como se define en industria. Considerando la segunda derivada del campo eléctrico como valor constante, estimado como factor de un décimo del valor original, probando la expresión (9), aunque sin hacer la sobre simplificación. Además, el elemento de la derecha corresponde a las variaciones o pérdidas de la eficiencia del sistema en términos de los cambios de corriente y resistencia, que vienen del efecto de Joule y las corrientes de Eddy.

La expresión de la izquierda para medir las propiedades de los conductores, dejando de lado la expresión del cambio de campo eléctrico, los elementos que quedan corresponden a las milésimas circulares (πr^2) y la cantidad de corriente que se va a suministrar. Se espera que la expresión de la segunda derivada corresponda a 0.1 para que sea idéntico a la expresión empleada en las fábricas:

$$\frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = \frac{1}{10} \quad (13)$$

Resolviendo por transformada de Laplace, considerando que en el tiempo cero no hay corriente, ni diferencia de potencial, tampoco campo, además de que el cambio del campo si debe tener un valor constante. Lo último se justifica bajo la posibilidad la corriente es constante durante un determinado tiempo en que la eficiencia no baje del 90%. Para una aproximación, una expresión trigonométrica corresponde al campo eléctrico, para lo cual el factor de decaimiento del campo se da como una décima parte del valor efectivo con respecto al teórico:

$$E(t) = \frac{\sqrt{\cos(2\pi t)}}{10} \quad (14)$$

Queda demostrada una nueva expresión para el cociente del campo eléctrico con respecto a la energía potencial esperada. La derivada implica un cociente de funciones trigonométricas, genera una función con valor cero en el tiempo inicial. La segunda derivada también implica una combinación lineal de funciones trigonométricas.

4 | RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Nunca habrá una coincidencia completa entre los valores reales registrados en la industria, con respecto a la teoría. Tampoco habrá coincidencia entre industria y otra. Al no haber métodos estandarizados a nivel mundial que sean un requisito indispensable, queda abierto a las ecuaciones que se implementen. Un ejemplo de ello, son los datos obtenidos de la compañía Medrano Magnetics S.A. de C.V., donde sus mediciones de intensidad de campo se realizan con pruebas de capacidad de carga para dos escenarios: 1) distancia mínima que se requiere para generar un levantamiento y, 2) la cantidad máxima de carga que se puede levantar.

Otra cantidad que usan como referencia es algo similar a la cantidad de kilos por pulgada cuadrada, en la ignorancia de que se refiere al weber, otra unidad de intensidad de campo magnético. Se debe conocer las propiedades eléctricas y magnéticas de los materiales, incluyendo permeabilidad magnética. Esto en el caso de las aleaciones de acero, cambia de una a otra, siendo que nunca se usa el mismo material ni menos del mismo vendedor. Esta propiedad no se puede usar como un parámetro, quizá como un medio o un promedio de los valores obtenidos de tablas y registros teóricos. Por ejemplo, entre datos obtenidos de pruebas experimentales tenemos la siguiente información:

- Permeabilidad magnética del vacío, μ_0 : $1.2566 \times 10^{-6} \text{ N/A}^2$
- Permeabilidad magnética del hierro en aleación, μ : 180 N/A^2 (campo de baja magnitud), 2000 N/A^2 (campo de alta magnitud, límite)

- Permeabilidad magnética del hierro al 4% de silicio: 500 N/A^2 (campo de baja magnitud), 7000 N/A^2 (campo de alta magnitud, límite)

Se hicieron pruebas cualitativas con el control de algunos cuantos parámetros, para establecer las capacidades de carga, cuidando la configuración del equipo:

- Radio total, R_T : 0.95885 m
- Radio interno (de la bobina, radio de la zona de contacto del núcleo), R_i : 0.295275 m
- Radio medio, R_M : 0.64135 m
- Longitud de bobina, l : 0.013779527 m
- Conductividad del aluminio, σ_0 : $3.78 \times 10^{-7} \text{ S/m}$
- Área de sección transversal (del núcleo), A : 0.27391 m²
- Corriente: 120 A (CD), 0.8 A (CA)
- Vueltas de embobinado: 659, 1316, 1600

La cantidad de vueltas de conductor es el elemento más importante en el diseño, ingeniería y producción de electroimanes, esto debido al costo de producción, como también la intensidad de campo magnético y de carga en kilogramos. Estos dos últimos, son válidos para un sistema con alta simetría geométrica, generando un campo uniforme en todas las direcciones. Tomando una tabla de valores del trabajo de Flores y compañeros, se tienen estimaciones de las capacidades de los electroimanes. El diseño esperado, usando la expresión considerada como óptima en la industria:

$$B = NI = F \quad (15)$$

La tabla emplea la expresión de campo magnético y de fuerza de levante, de los cálculos previos. Los valores esperados se muestran en decenas de miles de Tesla. Aunque la fuerza corresponde a un valor estimado aceptable, ningún de estos valores son reales. Los electroimanes usados en la industria pueden cargar hasta mil kilos, con una proporción de seguridad de 3 mil.

Si tomamos una expresión de campo directa, como se usa en industria, vemos que un campo de 8000 gauss (0.8 Tesla) como máximo, que se suele reportar en los experimentos, debe corresponder a 66 vueltas de conductor para los 120 amperes de alimentación. No hay coincidencia entre los datos reportados en las fichas técnicas, los datos registrados en pruebas de campo y los estimados por el modelo matemático. En tablas, el electroimán de menor capacidad tiene mas de 600 vueltas de conductor.

Densidad de flujo magnético (N/A²)			
Corriente directa (120 A)			
Numero de vueltas del embobinado	Material	Flujo mínimo	Flujo máximo
658	98.5Fe-1.5C	1.318 x 10 ⁷	1.465 x 10 ⁸
	96Fe-4Si	3.662 x 10 ⁷	5.127 x 10 ⁸
	90Fe-10C	2.637 x 10 ⁸	
1316	98.5Fe-1.5C	2.637 x 10 ⁷	2.93 x 10 ⁸
	96Fe-4Si	7.325 x 10 ⁷	1.025 x 10 ⁹
	90Fe-10C	5.274 x 10 ⁸	
1600	98.5Fe-1.5C	3.206 x 10 ⁷	3.562 x 10 ⁸
	96Fe-4Si	8.905 x 10 ⁷	1.247 x 10 ⁹
	90Fe-10C	6.412 x 10 ⁸	
Numero de vueltas del embobinado	Material	Fuerza mínima (Newton)	Fuerza máxima (Newton)
658	98.5Fe-1.5C	1803.506	5009.739
	96Fe-4Si	1803.506	25249.083
	90Fe-10C	24047.559	
1316	98.5Fe-1.5C	7214.024	20038.955
	96Fe-4Si	7214.024	100996.333
	90Fe-10C	96190.235	
1600	98.5Fe-1.5C	10663.647	118484.969
	96Fe-4Si	10663.647	474697.392
	90Fe-10C	4.275 x 10 ⁸	

Tabla 1. Datos generados por ecuaciones obtenidas de modelos simplificados.

De la ecuación (2), usando las condiciones de valores registrados, 7700 kilos aproximadamente, usando el factor 3:1 de seguridad, deja con 2567 kilos. Con esta ecuación obtenida de una simplificación, se acerca al valor real obtenido en las pruebas experimentales en planta. Aunque, siendo un lugar con interferencia magnética, no se puede obtener un valor nominal próximo a equipos empleados en campo.

5 | EFICIENCIA DEL SISTEMA Y LÍMITES

De tres mil kilos estimados en experimentos hasta los 3383 del cálculo, se tiene una variación de 12.77%. Demasiado en cuestiones de errores porcentuales. Sin embargo, el

modelo empleado en ingeniería genera una fuerza de 7346 kilos, la aproximación sigue siendo un estimado. El modelo teórico se puede mejorar para determinar un valor próximo a lo real, mientras que las expresiones de ingeniería solo se alejan del resultado en más de un cien por ciento.

Como se mencionó antes, ninguna de las aproximaciones será suficientemente realista hasta que se tengan datos controlados o materia prima controlada. Otra opción radica en tener un programa que evalúe los datos posibles con diferentes configuraciones de materia prima con cantidad de conductores, corrientes. Este sistema implica un tiempo de trabajo por cada empleado, esto implica un gasto de recursos o pagos mayores y no es admisible para algunas empresas.

Mientras no se tenga conocimiento preciso de los materiales que se compran y emplean [Jontz, M. L., 1948], no habrá manera de controlar las capacidades de funcionamiento de electroimanes. Los modelos teóricos son importantes en cualquier producción industrial, y cuando esta no puede parar, se trabajan a la par de la producción, con toma de datos en tiempo real.

6 | CONCLUSIONES

Los modelos teóricos son útiles para la industria e ingeniería. Las estrategias de algunas empresas por mantener sus procesos en secreto como una manera de evitar la competencia y el plagio, no tiene sentido. Siendo que los negocios e industrias grandes tienen un departamento de ingeniería inversa, dedicado a entender el funcionamiento del equipo en el mercado. Entonces, la mejor manera de tener control de los procesos de mejora en su línea de producción radica en una comunicación efectiva con especialistas para entender como los productos con prueba y error, han funcionado.

Las ecuaciones y fórmulas mostradas en el presente trabajo demuestran el valor de aproximaciones teóricas en el entendimiento de la producción de empresas. Aunque no se consiguió un modelo que fuera fiel a los valores reales, se probó una eficiencia mayor que los modelos usados en ingeniería limitados a solo dos factores.

Cuando se determinan los estudios científicos para comprender las empresas con su producción, se requiere un equilibrio entre la parte científica, técnica, de ingeniería y los datos experimentales para tener un modelado que sea robusto para con los requerimientos de cada empresa. Se pueden establecer estos para ramas de producción.

La transparencia puede establecer nuevos productos y líneas de producción con mayor eficiencia. Los electroimanes son una combinación de disciplinas como electrónica, electricidad, magnetismo, mecánica y estática. Empleando modelos matemáticos establecidos detiene el uso de tablas que fueron elaboradas hace décadas. Las ecuaciones y el sistema predictivo se pueden actualizar para necesidades futuras de las compañías. Puede haber una teoría matemática general que vaya adaptándose a cada aplicación,

cambiando los parámetros. Conforme mayor tiempo y ecuaciones se usen en los desarrollos, mayor la precisión y exactitud con sistemas reales, desarrollando una industria inteligente que se acople a las necesidades del mercado y de sus empleados, minimizando pérdidas, costos y desecho de materiales.

REFERENCIAS

MOREAU, L. The place of magnets in modern industry. **IEEE Transactions on Magnetism**, año 1970, v. 6, n. 2, p. 255-260. <https://doi.org/10.1109/tmag.1970.1066787>

ANDERSEN, S. B., Santos, I. F., Fuerts, A. Multi-physics modeling of large ring motor for mining industry – Combining electromagnetism, fluid mechanics, mass and heat transfer in engineering design. **Applied Mathematical Modeling**, año 2015, n. 39, p. 1941-1965. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2014.10.017>

LANDAU, L. D., Lifshitz, E. M. **Electrodynamics of Continuous Media. Volume 8: Course of Theoretical Physics**. Pergamon Press: 2nd edition, 1984.

OLIVEROS MESA, N. F., Solarte Blandón, P. A., **¿Cómo hacer un electroimán?** Universidad Nacional de Colombia, 2012.

FLORES MARTÍNEZ, N. A., Guzmán Ramos, V., Guzmán González, J. E. **Fundamentos físico-matemáticos para la construcción de electroimanes industriales: orientado a datos experimentales de un modelo funcional**. Amazon Kindle Publishing, 2022, p. 23-31, 70-79

BARAN, W. K. A. Influence of different magnetic field profiles on Eddy-current braking. **IEEE Transactions on Magnetism**, año 1970, v. 6, n. 2, p. 255-260. <https://doi.org/10.1109/tmag.1970.1066758>

REITZ, J. R., Milford, F. J., Christy, R. W. **Fundamentos de teoría electromagnética**. 3era edición. Addison-Wesley Interamericana, 2008.

BUTKOV, E. **Mathematical Physics**. St. John's University, Nueva York, Estados Unidos: Addison-Wesley Publishing Company, 1973, p. 154-156, 291-294, 503-543.

GRATTON, J. **Introducción a la Mecánica de Fluidos**. Buenos Aires, Argentina, 2002, p. 51, 52, 57-59.

ARIS, R. **Vectors, Tensors and the Basic Equations of Fluid Mechanics**. Dover Publications, 1989, Chapter 6, ISBN: 0-486-66110-5

JONTZ, M. L. Permanent magnets in the ceramic industry. **Transactions of the Indian Ceramic Society**, año 1948, v. 7, n. 2, p. 64-68. <https://doi.org/10.1080/0371750x.1948.10877851>