

ANÁLISIS EXPERIMENTAL PARA LA OBTENCIÓN DE VARIABLES QUE REPORTEN LA FUERZA ÓPTIMA EN UN ACTUADOR ELECTROMAGNÉTICO EN LA SEPARACIÓN DE RESIDUOS FERROSOS EN LA COSECHA MECANIZADA DE GRANOS DE MAÍZ

G. A. Herrejón P., *S. Llamas Z.*, A. Montes de Oca N.

Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Zamora

* Universidad de Colima, facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.

g.alex.herrejon.p@gmail.com

Resumen Se discute el análisis experimental y su resultado en la obtención de los parámetros y variables del desempeño óptimo de un actuador electromagnético, en la separación de residuos ferrosos en la cosecha de granos agrícolas, esto con la ayuda de un prototipo para pruebas, el cual se operó inicialmente de acuerdo con los datos de los parámetros magnéticos obtenidos en la solución del problema de campo en la simulación del software ANSYS. Y después se manipularon los parámetros magnéticos (variables) que influían directamente en la fuerza óptima de atracción magnética.

I. INTRODUCCIÓN.

Los diseños en los actuadores electromagnéticos contemplan características como alta velocidad en el recorrido de la armadura, una fuerza magnética de atracción considerable [1], observar la Tabla.1 una de varias en [2].

Tabla 1. Clasificación de actuadores lineales

ACTUADORES LINEALES (para cd.)	
Del tipo levantamiento	
1.- Tipo cara plana:	Se construyen en tamaños grandes; en general proporcionan una gran fuerza en distancias relativamente cortas; diseño económico.
2.- Tipo herradura:	Su armadura es también de cara plana; por lo general no son baratos; no se construyen en grandes tamaños; son flexibles para su colocación mecánica.
Del tipo solenoide	
3.- Embolo cara plana:	Este diseño es relativamente económico, produce una fuerza pequeña a través de una distancia larga.
4.- Embolo cara cónica:	Es idéntico al de embolo cara plana excepto que su rango de utilidad hablando en términos económicos es más amplio que el de cara plana y la fuerza es menor.
5.- Embolo cara cilíndrica:	Este tipo es muy apropiado para movimientos relativamente largos y fuerzas pequeñas, más aún que el de cara cónica.
6.- Embolo con cara cilíndrica en pasos:	Mejora la caída de fuerza durante el desplazamiento del embolo de cara cilíndrica, debido al cambio de permeancia entre el embolo y la armadura (se utilizan varios pasos o etapas).
7.- Embolo afilado o adelgazado:	Equivale a un incremento infinito del numero de pasos cilíndricos que finalmente adelgazan el embolo y logran una fuerza casi

el diseño de estos depende de las necesidades de fuerza, distancia y velocidad, etc. de la aplicación. En este trabajo se hace una recolección de contaminantes ferrosos en la cosecha de maíz Pisingallo, por tanto es deseable un actuador capaz de atrapar estos fragmentos en toda al área de la cama de granos, el tipo de actuador que por su forma en su diseño cumple con este requisito aparte de generar una gran fuerza en distancias cortas, que también es deseable, según la Tabla 1 corresponde a un actuador de cara plana, en la Figura 1 se muestra la forma del actuador a utilizar y es obvio por su diseño que cumple con las necesidades espaciales del problema.

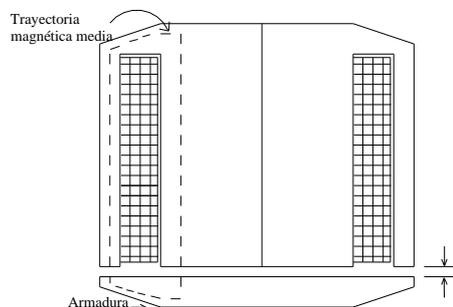


Figura 1. Tipos de actuadores electromagnéticos.

Se determinó el tamaño muestral para el análisis experimental, con el fin de asegurar que los resultados obtenidos presentaran un alto índice de confiabilidad.

También se aplicó el software MINITAB, para la evaluación estadística de los resultados obtenidos. Aquí se incluyeron Análisis de Varianza, de Correlación y Gráficos del Comportamiento entre variables. Para finalmente presentar la conclusión de los resultados obtenidos.

A Antecedentes.

La agricultura (del latín agricultura 'cultivo de la tierra', y éste de los términos latinos agri 'campo' y cultura 'cultivo, crianza') es el conjunto de técnicas y conocimientos para cultivar la tierra, es una actividad de gran importancia estratégica como base fundamental para el desarrollo autosuficiente y riqueza de las naciones. La ciencia que estudia la práctica de la agricultura es la agronomía. El inicio de la agricultura se encuentra en el período Neolítico, cuando la economía de las sociedades humanas evolucionó desde la recolección, la caza y la pesca a la agricultura y la ganadería.

Según la Academia Internacional de Ingeniería de EE.UU., la mecanización agraria es uno de los 20 mayores logros de la ingeniería del siglo XX. A principios del siglo XX, en EE.UU. se necesitaba un granjero para alimentar de 2 a 5 personas, mientras que hoy, gracias a la tecnología, los agroquímicos y las variedades actuales, un granjero puede alimentar a 130 personas. Por su parte en el campo agrícola, los mecanismos a motor que se emplean en estas labores aligeran la producción y mejoran las técnicas de cultivo. Equipos Agrícolas: Los equipos agrícolas son un grupo de aparatos

diseñados para abrir surcos en la tierra, desmenuzar, fumigar y fertilizar en el suelo. Herramientas Agrícolas: Las herramientas agrícolas son instrumentos que se utilizan para labrar la tierra, cargar arena, desyerbar, remover la tierra, abrir zanjas, transportar abono o material, etc.

Durante la cosecha mecanizada de granos agrícolas [3], estos la mayoría de las veces se contaminan con residuos ferrosos provenientes de elementos mecánicos sometidos a desgaste. Las industrias de transformación que manejan estos granos agrícolas, se ven en la necesidad de parar sus procesos; debido a que estos residuos ocasionan daños considerables en su maquinaria así como un aumento en los costos de producción. Algunas industrias de transformación realizan esta separación de residuos ferrosos manualmente, mientras que otras utilizan una zaranda cilíndrica equipada con imanes permanentes; manejando por ende pequeños volúmenes de producción. Si estas industrias contarán con un módulo separador automatizado; alcanzarían la separación total de estos residuos ferrosos así como un mayor volumen de producción.

La contaminación causada por la presencia de metales pesados [4] generados cada año. Muchas especies metálicas son conocidas por sus efectos nocivos sobre la salud, y forman parte de la lista de contaminantes prioritarios de la Agencia de Protección Ambiental de los EE.UU.. (US EPA) como el cromo, mercurio, cobre, níquel, cadmio, hierro y otros.

II. SOLUCIÓN DEL PROBLEMA DE CAMPO

A. Bajo el Enfoque de Circuitos Magnéticos

Se plantea resolver el problema bajo el enfoque de circuito magnético, entonces a partir del diseño mostrado en la Figura 2 se encuentra el equivalente eléctrico.

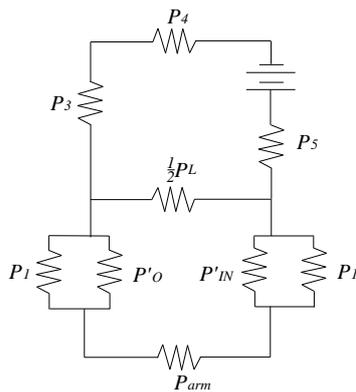


Figura 2. Circuito eléctrico equivalente con Permeancias.

Se pasan los valores de Permeancias a su valor de reluctancia y se genera el sistema de ecuaciones, que permita encontrar el valor de los flujos magnéticos en el actuador.

$$\begin{bmatrix} \left(\frac{1}{2}R_L + R_3 + R_4 + R_5\right) & -\frac{1}{2}R_L \\ -\frac{1}{2}R_L & \left(\frac{1}{2}R_L + R_{eIN} + R_{0out} + R_{arm}\right) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Notece que aparecen los términos R_{eIN} y R_{0out} en realidad son la reluctancias equivalentes de los paralelos en la rama que representa el entrehierro.

$$R_{0out} = \frac{R_1 R_o}{R_1 + R_o} \quad (2)$$

$$R_{eIN} = \frac{R_{IN} R_1}{R_{IN} + R_1} \quad (3)$$

La solución del sistema reporta los siguientes valores de flujo magnético.

$$\varphi_1 = -0.6378 \text{ mWb}$$

$$\varphi_2 = -0.3011 \text{ mWb}$$

Y de forma similar a un pos proceso en el método de elemento finito (MEF), a partir de la variable de solución en este caso el flujo, se obtendrá la variable de interés la fuerza magnética [5] en el elemento móvil, es decir la fuerza que experimentan los contaminantes ferrosos.

$$F = \frac{B_g^2 S}{2\mu} \quad (4)$$

La densidad de campo magnético, necesaria para encontrar la fuerza, es obtenida de (5).

$$\varphi = \iint B ds \quad (5)$$

La magnitud de la fuerza calculada en la parte móvil para un entrehierro con longitud de 10.23 mm es de:

$$F = 20.2719 \text{ N}$$

Con la intención de tener mayor claridad en el comportamiento del campo magnético y discriminar cuanto de la magnitud de fuerza se ejerce en el eje de interés, se modela el actuador en software de elemento finito [6], con ello se tendrá la componente vectorial de la fuerza magnética $F_y \hat{a}_y$, es decir el movimiento vertical de las piezas a atraer y sus mapas de vectores, que indican la distribución espacial de esta y de otras cantidades como el vector densidad \mathbf{B} e intensidad de campo magnético \mathbf{H} . En la Figura 3 puede verse el mapa de contornos del potencial magnético vectorial \mathbf{A} , que dicta el comportamiento del flujo magnético [7], ya que ϕ_m es una escalamiento del potencial magnético vectorial, esto puede entenderse mejor a partir de la expresión para ϕ_m .

Tomando la ecuación (5) y aplicando la definición de potencial magnético vectorial se tiene.

$$\phi_m = \int_S \nabla \times \mathbf{A} \cdot d\mathbf{S} \quad (6)$$

Aplicando el teorema de Stokes se tiene

$$\phi_m = \iint_L \mathbf{A} \cdot d\mathbf{l} \quad (7)$$

En geometrías axial simétricas, esta integral de contorno está dada por.

$$\phi_m = \int_0^{2\pi} A_\varphi \rho d\varphi = 2\pi \rho A_\varphi \quad (8)$$

$$\phi_m = 2\pi\rho A_\phi \quad (9)$$

De aquí puede apreciarse con claridad el escalamiento del flujo magnético respecto a la componente \hat{a}_j del potencial magnético vectorial. El factor de escalamiento es $2\pi\rho$ y se nota que no es constante del todo ya que es dimensional, por el radio ρ , sin embargo un escalamiento no cambia la dirección y en este caso tampoco el sentido del vector, únicamente su magnitud.

B. Bajo el Enfoque del Método de Elemento Finito.

Se recurre al MEF, buscando mayor información, como las distribuciones espaciales de las variables magnéticas implícitas en el problema, tanto en magnitud como vectorialmente, esto permite entre otras cosas, tener una idea más clara de en qué medida existe fuerza en zonas de la bobina.

Por ejemplo al ver la Figura 3 se aprecia una densidad de flujo mayor en la parte inferior de la bobina comparada con la parte superior y al ver la Figura 5 se confirma que en esta parte del actuador podrían acumularse limaduras ferrosas, que con el tiempo podrían modificar el comportamiento de las cantidades magnéticas, ya que con el tiempo formarían un camino alternativo para el flujo provocando una disminución de este en las caras polares, esto sugiere que el actuador en operación debe tener un mantenimiento preventivo (limpieza) cada cierto tiempo.

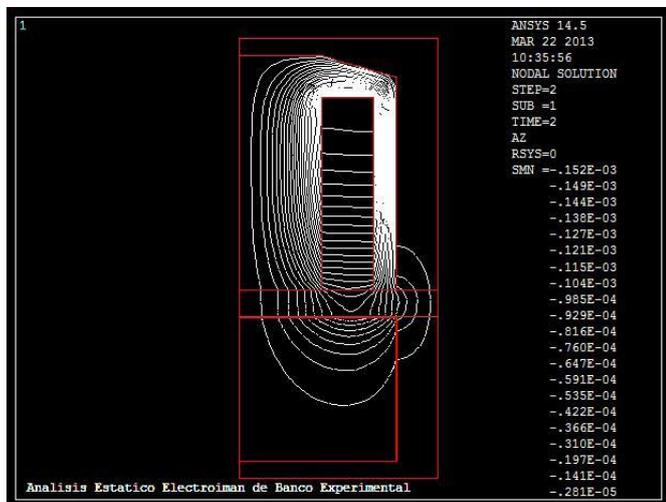


Figura 3. Mapa de contornos, del comportamiento del flujo magnético en el actuador y en la cama de granos y residuos ferrosos.

De la Figura 3 se advierte que la cama de granos y residuos ferrosos fueron simulados como una sola piza de acero, pues modelar una gran cantidad de entrehierros de diferentes formas, tamaños y posiciones, es un tanto complejo, en este tipo de simulación ya que es un modelo axial-simétrico y aun que se simularan esos entrehierros en la cama de granos, nunca se presentaría la misma configuración de los mismos, esto implica pues que no dejaría de ser una aproximación el conjunto de resultados en esa zona, por lo tanto se decidió simular la combinación de granos agrícolas y ferrosos con una sola pieza de metal de mayor reluctancia, ya que una buena cantidad de pequeños entrehierros, provocados, por

los espacios vacíos entre granos ferrosos y los espacios ocupados por el maíz que evidentemente no tiene una permeabilidad magnética favorable, para el establecimiento del flujo en ellos, ocasiona reluctancias de alto valor, impidiendo que el flujo magnético se establezca con facilidad en las impurezas ferrosas. Por lo tanto al modelo de esta pieza de acero se le asignó una permeabilidad magnética menor a la que tendría el residuo ferroso, o en su caso no lineal una curva de saturación de acero con menor calidad magnética.

El modelo propuesto, para la cama de granos, da una idea inicial de las cantidades magnéticas que se podrían llegar a presentar en la zona de granos y contaminantes ferrosos, eso se pretende demostrar prácticamente en el prototipo de pruebas, como ya se mencionó el modelo en MEF permite eliminar incertidumbres del comportamiento de las variables magnéticas en el actuador, en función del parámetro de entrada (voltaje) o de la variable densidad de corriente \mathbf{J} [8]. Por ejemplo, con los resultados de esta simulación se conoce cuanta de la magnitud de fuerza calculada con el enfoque de circuito magnético en un caso

lineal, se manifiesta en \hat{a}_y o eje del grado de libertad, ver la Figura 4.

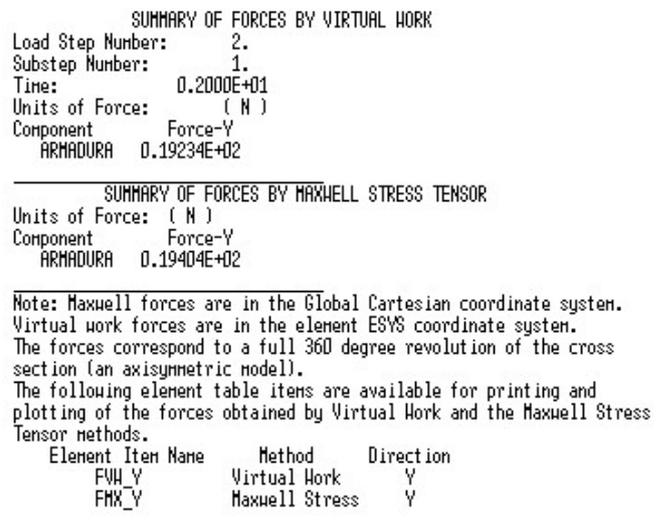


Figura 4. Resultados de la fuerza magnética en el elemento móvil, caculos basados en la solución del problema de campo, el tensor de Maxwell y Método del trabajo virtual utilizando MEF.

Los resultados de Fuerza en la Figura 4 confirman que prácticamente toda la fuerza calculada en el apartado A de esta sección, se manifiesta en el eje “y”, es decir:

$$20.2719 @0.1923' 10^2 @0.1940' 10^2 \text{ N}$$

También en la Figura 5 puede verse con mayor claridad, que aun en las partes más alejadas de las caras polares del actuador se tiene presencia de vectores de fuerza magnética, esto es importante ya que por el peso de algunas partículas de acero, estas podrían encontrarse en esas zonas alejadas. El enfoque basado en circuitos magnéticos no brinda esta información, ya que el elemento móvil es modelado como una reluctancia, para tener información de este tipo bajo ese esquema se deben recalcular algunos valores de las reluctancias, por ejemplo la de la pieza con movimiento, pues cambiaría su área de sección transversal.

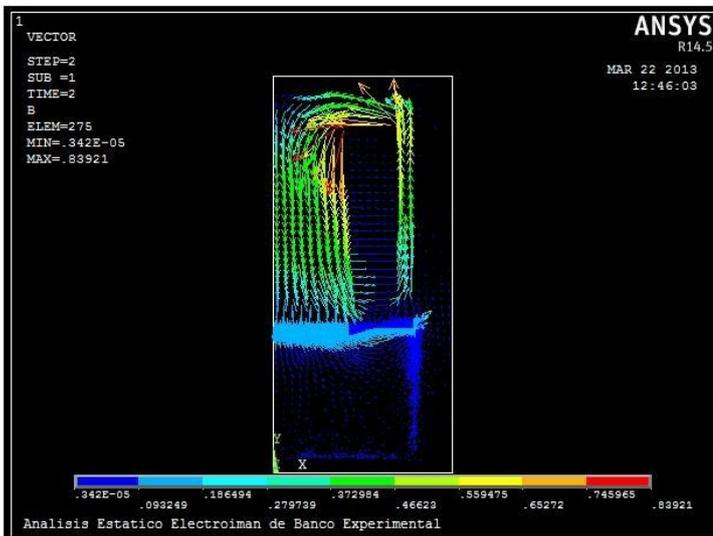


Figura 5. Vectores de Fuerza en el actuador y zona de la cama de granos e impurezas.

III. RESULTADOS DEL ANALISIS EXPERIMENTAL DEL ACTUADOR.

El objetivo es determinar la fuerza óptima y sus parámetros de entrada (corriente, distancia) para la separación de los contaminantes ferrosos en una cosecha de maíz, para ello es necesario contar con un módulo de experimentación, en las siguientes Figuras puede verse el prototipo de pruebas experimentales.



Figura 15. Módulo de pruebas en operación.

El prototipo de experimentación consta de partes principales como Distribuidor de granos, Actuador, Banda transportadora de la cama de granos cosechados, Colector de granos después del proceso de limpieza.

En el diagrama de la Figura 16 se puede observar el flujo de maíz pisingallo contaminado con residuos ferrosos “m_r” por el transportador “V” hasta pasar por debajo del electroimán donde se aplica la fuerza de atracción magnética “F” de acuerdo a una distancia “h” entre el maíz y las caras polares de atrapamiento “B_d”

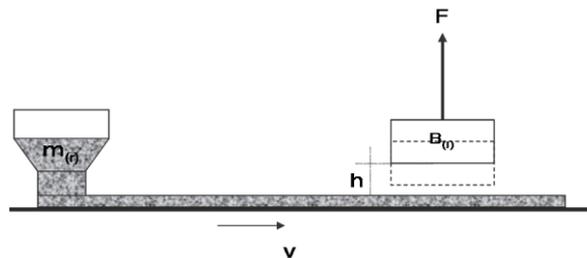


Figura 16. Esquema de Variables.

De entre las variables independientes (relación entre impureza ferrosa y maíz r , masa de maíz “m”, velocidad del transportador v , distancia entre el electroimán y maíz “h”, corriente en la bobina “I” y de las variables dependientes (fuerza de atracción magnética F , campo magnético B).

Se eligieron por su relación directa con la fuerza de atracción magnética como variables manipulables (la distancia entre el electroimán y maíz “h”, así como la corriente de la bobina “I”.

Para evaluar la relación tanto de distancia entre el electroimán y maíz como la corriente respecto a la fuerza de atracción magnética se aplica una técnica estadística denominada **Análisis de Varianza Bifactorial** [9], la cual permite evaluar tanto el efecto individual así como en conjunto, de dos variables independientes (variables de entrada) sobre una sola variable dependiente (variable de salida).

Siendo las hipótesis nulas: No existe interacción de las distancias entre el electroimán y maíz respecto a sus corrientes. Y las hipótesis alternativas: Si existe interacción de las distancias entre el electroimán y maíz respecto a sus corrientes.

Se determina el tamaño de la muestra experimental.

$$z = 95\%$$

$$p = 50\%$$

$$q = 50\%$$

$$e = 3\%$$

$$N = \frac{(1.96)^2(0.5)(0.5)}{(0.03)^2} = 1067$$

En la Tabla 2 se pueden ver los resultados de la Fuerza Óptima de Atracción Magnética.

Tabla 2. Resultados.

Num	Distancia entre Polo y	Corriente en el Núcleo	Intensidad de Campo	Fuerza de Atracción	Impureza Ferrosa	Eficiencia del
	Material (mm)	(Amperes)	Magnético (Teslas)	Magnética (Newtons)	Atrapada en Electroimán (gramos)	Electroimán (%)
	h	I	B	F	r	e
1	0.35	0.10	0.8207	18.5001	27.3	34.18
2	0.71	0.10	0.4104	4.6250	8.1	10.10
3	0.71	0.30	1.2311	41.6253	60.7	75.83
4	1.06	0.10	0.2736	2.0556	4.8	6.03
5	1.06	0.20	0.5471	8.2223	13.9	17.34
6	1.06	0.40	1.0943	32.8891	49.0	61.27
7	1.41	0.10	0.2052	1.1563	4.0	4.97
.....	1.41	0.60	1.0259	28.9065	44.0	55.05
.....	1.76	0.10	0.1641	0.7400	3.8	4.79
.....	1.76	0.20	0.3283	2.9600	7.3	9.08
.....	1.76	0.40	0.6566	11.8401	20.3	25.35
.....	2.12	0.10	0.1368	0.5139	4.0	4.96
.....	2.12	0.40	0.5471	8.2223	15.6	19.51
.....	2.12	0.80	1.0943	32.8891	51.0	63.79
167	6.70	2.70	1.1683	37.3590	66.3	82.86
168	6.70	2.80	1.2085	40.1776	70.4	87.98
169	6.70	2.90	1.2527	43.0886	74.6	93.28
170	6.70	3.00	1.2953	46.1222	79.0	98.75
171	7.06	0.10	0.0410	0.0463	10.0	12.52
172	7.06	1.10	0.4514	5.5963	19.6	24.55
173	7.06	1.30	0.5335	7.8163	23.1	28.88
.....	7.06	1.70	0.6976	13.3663	31.6	39.45
.....	7.06	1.90	0.7797	16.6964	36.6	45.69
.....	7.06	2.10	0.8617	20.3964	42.1	52.58
.....	7.06	2.30	0.9438	24.4664	48.1	60.10
.....	7.06	2.70	1.1080	33.7165	61.7	77.07
.....	7.06	2.90	1.1900	38.8965	69.2	86.51
.....	7.41	0.10	0.0391	0.0420	10.5	13.12
1167	25.40	2.60	0.2850	2.2304	42.1	52.58
1168	25.40	2.70	0.3078	2.6016	42.9	53.61
1169	25.40	2.90	0.3306	3.0013	43.7	54.68

La Tabla 1 muestra la distancia y corriente en la que mejor se comportó el actuador para la tarea asignada. Esto sugiere que se

puede indagar aún más sobre el diseño, ya que la característica fuerza-distancia del diseño indica que a menor distancia la fuerza sube exponencialmente ver Figura 17, y pudiera pensarse que reduciendo esta distancia debería atrapar mayor volumen de impurezas, sin embargo la tabla de experimentos revela que no necesariamente es así.

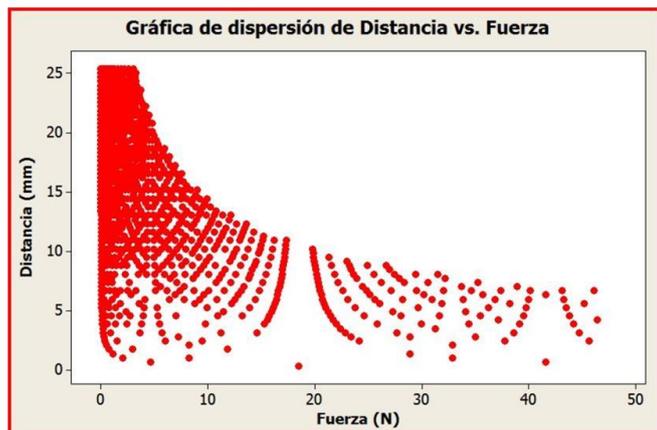


Figura 17. Característica Fuerza Distancia.

De la Figura 18 se puede interpretar el desempeño del actuador, en función de su corriente.

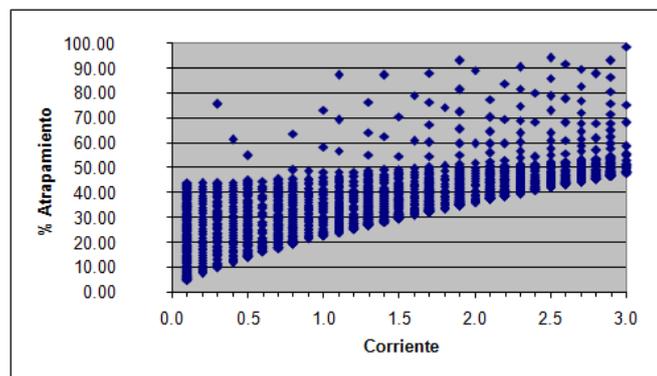


Figura 18. Eficiencia del electroimán respecto a la Corriente.

Se puede observar que la eficiencia del actuador respecto a la corriente, no es exactamente lineal, ya que se tiene una buena eficiencia, desde los 2 hasta los 3 Amperes. Sin bajar de forma drástica en valores de 1 a 2 Amperes.

En la Figura 19 puede verse la eficiencia del actuador pero ahora respecto a la distancia.

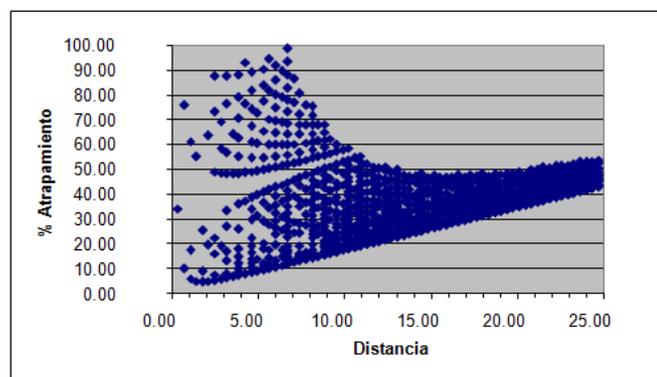


Figura 19. Desempeño del actuador respecto a la distancia.

IV. CONCLUSIONES

Se obtuvo la solución del problema de campo magnético, dado por el actuador, bajo el enfoque de circuitos magnéticos y se contrastó su solución con los resultados reportados por el Método de Elemento Finito. Y los cálculos de fuerza por ambas metodologías coincidieron con bajo porcentaje de discrepancia.

Se analizó el desempeño del actuador en una aplicación dada y se obtuvieron resultados de eficiencia del mismo a partir de experimentos, variando la distancia entre las caras polares del actuador y las partículas a recolectar, así como la variación de la corriente eléctrica, esto con base en el análisis estadístico.

Se encontró la forma y detalles de la característica de fuerza contra distancia, obtenida mediante análisis estadístico, así como gráficos de eficiencia del dispositivo para aplicación.

V. REFERENCIAS.

- [1] H.C. Roters, *Electromagnetic Devices*, John Wiley & Sons, London, 1941.
- [2] G.A. Herrejón P., *Análisis y diseño de actuadores tipo solenoide*, Tesis de Maestría, Instituto Tecnológico de Morelia Programa de Graduados e Investigación en Ingeniería Eléctrica, Morelia, Junio del 2004.
- [3] NORMA MEXICANA, <http://200.77.231.100/work/normas/nmx/2010/proynmx-ff-116-scfi10.pdf>, Secretaría de Economía, México, D.F. 2010
- [4] CONTAMINANTES METÁLICOS, <http://www.cnea.gov.ar/xxi/ambiental/cyted/12cap06.pdf>.
- [5] M.N.O. Sadiku, *Elementos de Electromagnetismo*, Tercera Edición, Alfaomega, México 2003.
- [6] M.N.O. Sadiku, "A simple Introduction to Finite Element Analysis of Electro- magnetic problems", *IEEE Transactions on Education*, Vol. 32, No.2, May 1989.
- [7] G.A. Herrejón P., E. Melgoza., "Cálculo de flujo magnético y fuerza en un actuador tipo solenoide mediante el método de elemento finito", XVII Reunión de Verano de Potencia, Acapulco, 2004.
- [8] S.J. Salon, *Finite Element Analysis of Electrical Machines*, Kluwer Academic Publishers, Norwell, Massachusetts, 1995.
- [9] Tutoriales de la ayuda del Software MiniTab 15.1.20

VI. BIOGRAFÍAS.

G. Alejandro Herrejón Pintor, nació en Morelia Mich. En 1974. Realizó estudios de ingeniería eléctrica industrial y maestría en ciencias en ingeniería eléctrica en el Instituto Tecnológico de Morelia, México. Su área de interés es el estudio del campo electromagnético.

Sergio Llamas Zamorano

Obtuvo la licenciatura en Ingeniería Mecánica por la Universidad de Colima y la Maestría y el Doctorado en Ingeniería en la especialidad de Diseño Mecánico por la Universidad de Guanajuato. Su área de interés es el diseño de máquinas y análisis dinámico de sistemas mecánicos.

Aniceto Montes de Oca Nolasco, Obtuvo la licenciatura en Ingeniería Industrial Mecánica por el Instituto Tecnológico de ciudad Guzmán, actualmente trabaja en tesis de maestría en la facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad de Colima.