

CAPÍTULO 4ª MODELO DE SISTEMAS ELECTROMECHANICOS CON ACOPLE MAGNETICO

OBJETIVOS

1. Preparar y ejecutar el plan de acción para formular y resolver un modelo. (CDIO 2.1.1.4)
2. Obtener modelos conceptuales y cualitativos de diversos sistemas físicos. (CDIO 2.1.2.2)
3. Establecer las conexiones entre los fenómenos físicos y el modelo. (CDIO 2.1.2.3)
4. Usar modelos cuantitativos y soluciones. (CDIO 2.1.2.4)
5. Generalizar suposiciones para simplificar ambientes y sistemas complejos (CDIO 2.1.2.1)
6. Discutir una aproximación desde varias disciplinas para asegurar que el sistema se entienda desde todas las perspectivas relevantes. (CDIO 2.3.1.2)
7. Establecer prioridades dentro de las metas generales (CDIO 2.1.1.3)
8. Identificar sistemas propios y sistemas con interacción entre áreas (CDIO 2.3.2.4)

En los sistemas electromecánicos se transforma energía eléctrica en mecánica, como en los motores AC y DC, parlante, solenoide, etc., o mecánica en eléctrica, como en los generadores, celdas de carga, sensores piezoeléctricos, sensores térmicos etc.

Los sistemas electromecánicos tienen una gran aplicación en la industria, los laboratorios y en investigación, y se pueden clasificar en tres grandes grupos:

- Elementos de medición o transducción normalmente operados en el rango lineal y con bajas señales, como por ejemplo micrófonos dinámicos, galvanómetros, tacómetros etc.
- Elementos para actuación y producción de fuerza como solenoides, electroimanes y relevadores y, los de mayor potencia y de operación continua como los motores.
- Equipos generadores de energía eléctrica a partir de diferentes fuentes.

Clase 1:

- Acople por campo magnético
- Análisis de un sensor: galvanómetro
- Análisis de un actuador: solenoide

ACOPLE POR CAMPO MAGNETICO

Existen cuatro principios físicos básicos para describir la conversión de energía eléctrica en mecánica empleando el acople por campo magnético y viceversa:

1. Ley de Ampere: un conductor que porta corriente produce un campo magnético a su alrededor.
2. Ley de Faraday: un campo magnético variable en el tiempo induce un voltaje en un conductor que pasa a través de él. Este es el principio básico del transformador
3. Ley de Lorentz: un conductor que porta corriente en presencia de un campo magnético experimentará una fuerza sobre él: este es el principio motor.
4. Un conductor eléctrico que se mueve dentro de un campo magnético tendrá un voltaje inducido sobre él: este es el principio generador.

Producción del campo magnético.

La relación entre la intensidad de campo H y la corriente I que lo produce está dada por la integral cerrada:

$I = \oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l}$	1
--	---

En el sistema internacional H se mide A-vuelta/metro; y se puede asociar al "esfuerzo" que hace la corriente I para establecer un campo magnético. La concentración de líneas de campo alrededor del conductor se mide en términos de la densidad de flujo magnético B , medida en Webers por metro cuadrado o Tesla (T).

La relación entre intensidad y densidad está dada por:

$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$	2
-------------------------------	---

μ es la permeabilidad magnética del material, H/m (Henry/metro), y representa la facilidad o dificultad relativa para establecer un campo magnético en un material dado. Normalmente se habla de permeabilidad relativa como la relación entre la permeabilidad del material y la del espacio libre:

$$\mu_r = \frac{\mu}{4\pi \times 10^{-7}}$$

Se usarán estos conceptos para el desarrollo del modelo del solenoide.

Voltaje inducido por campo magnético variable

El voltaje inducido sobre una espira de material conductor es función de la tasa de cambio del flujo:

$$e_{ind.} = - \frac{d\phi}{dt}$$

Si una bobina tiene N espiras y el flujo a través de ellas es uniforme el voltaje inducido total será:

$e_{ind.} = -N \frac{d\phi}{dt}$	3
----------------------------------	---

El signo menos corresponde a la ley de Lenz: el voltaje inducido se opone al cambio que lo produce. Este signo normalmente no se incluye, porque el voltaje inducido se toma con polaridad tal que se opone al cambio.

Fuerza Electromagnética.

La ley de fuerza de Lorentz expresa la fuerza F sobre una partícula con carga q (Coulomb) que se desplaza con una velocidad v (m/s) en un campo magnético de densidad B (Tesla) y un campo eléctrico E (V/m) como:

$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$	4
---	---

Cuando sólo existe campo eléctrico la fuerza F sólo depende de la carga y de la intensidad del campo eléctrico y es colineal con E : no depende del movimiento de la partícula.

Cuando sólo está presente el campo magnético F es perpendicular al plano formado por los vectores v y B y su dirección está dada por la regla de la mano derecha: cuando el dedo pulgar apunta en la dirección de v y el índice en la dirección de B ; la fuerza F apunta en la dirección normal a la palma de la mano.

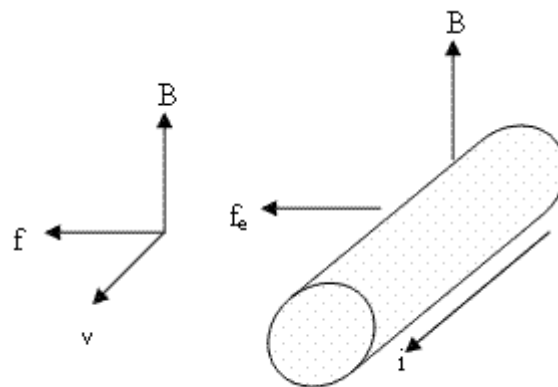


Figura 1

La fuerza \vec{F} actúa desde la región de alta concentración de líneas de flujo hacia la región de baja concentración (de derecha a izquierda en el ejemplo).

Cuando se tiene una gran cantidad de carga eléctrica en movimiento se reescribe la ecuación anterior en términos de la densidad de carga ρ (C/m^3) y F_V se expresa en términos de densidad de fuerza (N/m^3):

$\vec{F}_V = \rho(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$	5
--	---



Figura 2

El producto $\rho\vec{v}$ se denomina densidad de corriente J en (A/m^2)

$\vec{J} = \rho\vec{v}$	6
-------------------------	---

y la fuerza que actúa sobre un conductor en un campo magnético se define como:

$\vec{F}_V = \vec{J} \times \vec{B}$	7
--------------------------------------	---

Para un conductor de longitud l metros y que conduce una corriente de i amperios la fuerza inducida es:

$F = i(l \times B)$	8a
---------------------	----

La dirección está dada por la regla de la mano derecha y la magnitud por:

$F = ilB \sin \theta$	8b
-----------------------	----

θ es el ángulo entre el alambre y el vector de densidad de flujo. La acción de esta fuerza es la base del motor eléctrico.

Ejemplo. 1¹ Un rotor no magnético con una sola espira se coloca en un campo magnético B de 0,02 T. El radio del rotor es $R = 0,05\text{m}$ y la longitud es de 0,3m. La corriente es de 10 A, dirección hacia el papel en el punto 1, encontrar el torque en la dirección θ .

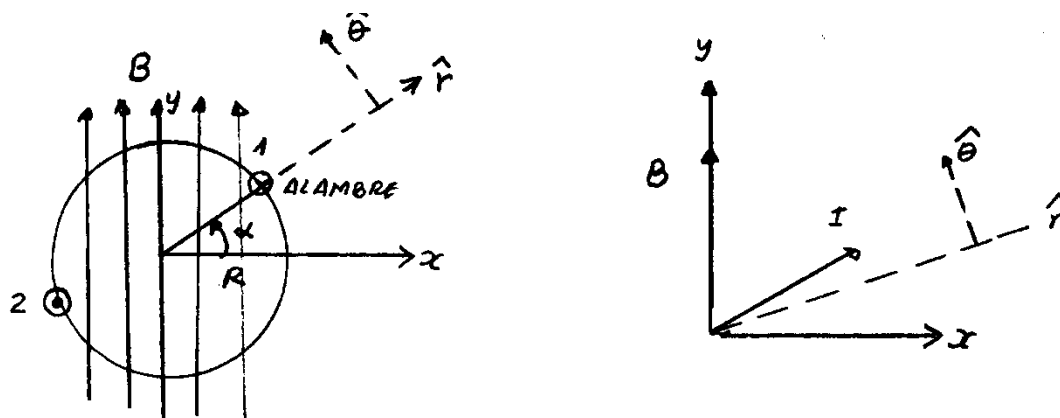


Figura 3

La ecuación:

$$\vec{F}_V = \vec{J} \times \vec{B}$$

relaciona la densidad de fuerza por unidad de volumen (N/m^3) con la densidad de corriente (A/m^2): si se multiplica a ambos lados por el área de la sección transversal:

¹ FITZGERALD A.E, KINGSLEY C., and UMANS S. Electric Machinery. 6ta Edition. Boston: McGraw Hill. 2003

$$\vec{F}_v A = (\vec{J} A) \times \vec{B}$$

$$\vec{F}_l = \vec{I} \times \vec{B}$$

Con F_l en N/m . La fuerza total sobre el conductor se obtiene integrando a lo largo de l . La magnitud es:

$$\vec{F} = B \ell i = 0,3 \times 10 \times 0,02 = 0,06 \text{ N}$$

y la dirección de f es sobre el eje x :

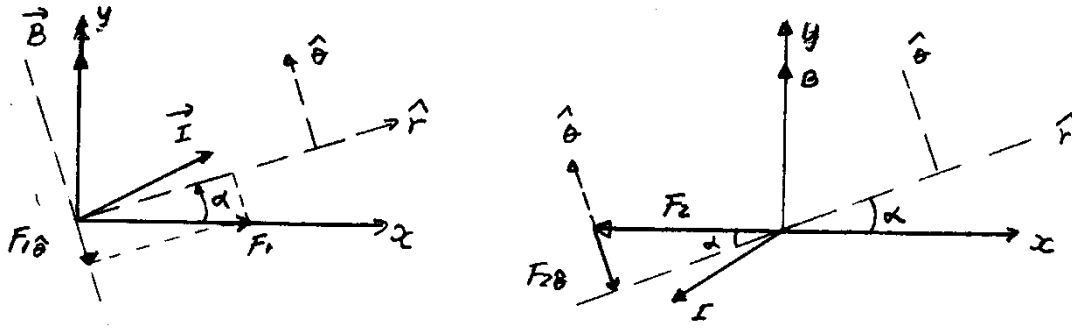


Figura 4

$$F_{1\theta} = -F_1 \sin(\alpha) = -0,06 \sin(\alpha) \text{ (N)}$$

Cuando la corriente cambia de dirección, punto 2:

$$F_{2\theta} = -F_2 \sin(\alpha) = -0,06 \sin(\alpha) \text{ (N)}$$

El torque total que actúa sobre el rotor en la dirección $\hat{\theta}$ es:

$$T = 2[-0,06 \sin(\alpha)] \times R$$

$$T = -0,006[\sin(\alpha)] \text{ (N-m)}$$

Este es un análisis simplificado de una situación física más compleja, asumiendo geometría del rotor muy sencilla y material no magnético.

Fuerza electromotriz inducida (FEM)

En un conductor que se mueve en un campo magnético se inducirá un voltaje:

$$de_m = (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l}$$

9

dónde v : velocidad del conductor [m/s]

e : voltaje inducido en el conductor [V]

l : longitud del conductor en el campo magnético [m]

El voltaje total inducido se obtiene integrando a lo largo del conductor.

En las aplicaciones que se estudiarán los tres vectores son perpendiculares: el producto $\vec{v} \times \vec{B}$ está en la dirección de \vec{l} :

$$e_m = vBl$$

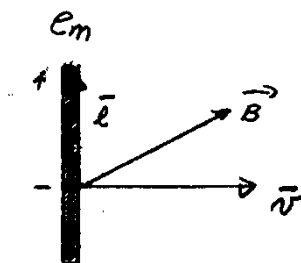


Figura 5

La polaridad de la fem inducida se puede establecer como:

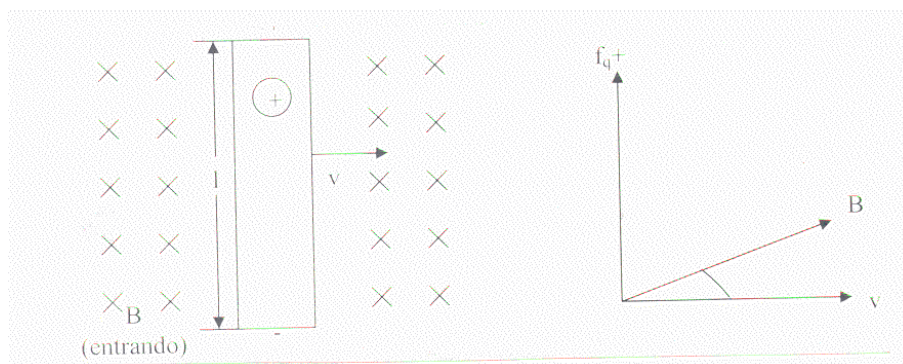


Figura 6

La fuerza sobre una carga q positiva está dada por $f_q = q(\vec{v} \times \vec{B})$ y es hacia arriba (hacia abajo sobre un electrón). Por tanto, la parte superior del conductor tendrá un potencial positivo respecto del extremo inferior

Los diagramas vectoriales siguientes indican la polaridad de la *fem* inducida sobre un conductor cuando se cambia el sentido del desplazamiento.

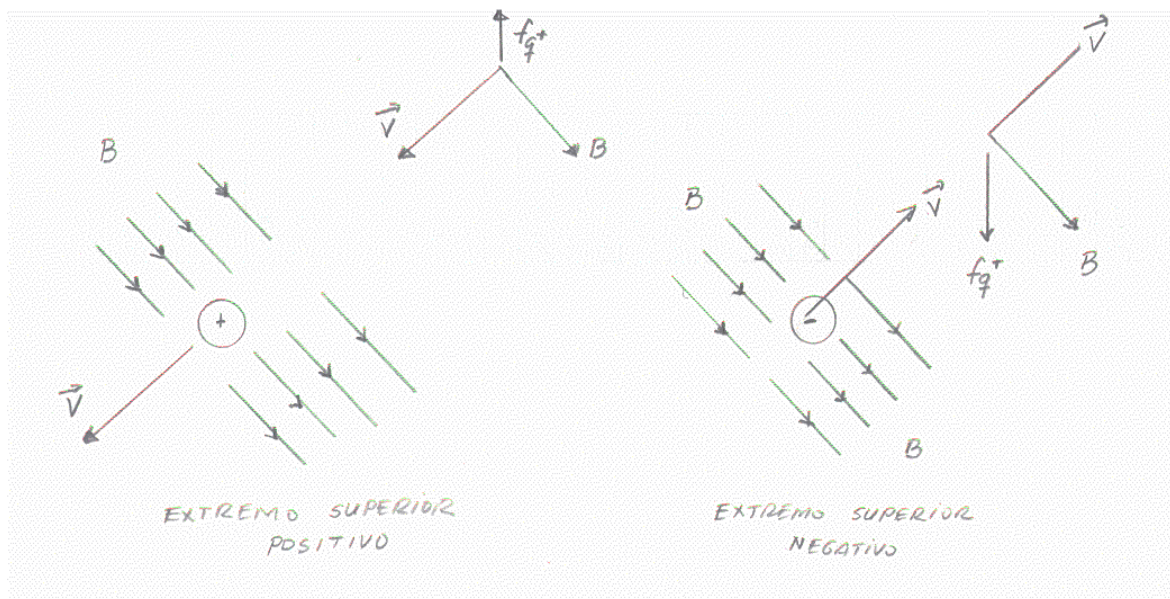


Figura 7

En el taco-generador se deducirá la ecuación general para el voltaje generado en función de la velocidad angular y las características físicas del generador.

Ejemplo 2. El Galvanómetro es un dispositivo que produce una deflexión angular $[\theta]$ en función de la corriente que circula a través de un circuito R-L. Sobre un cilindro se monta por medio de rodamientos una bobina, conectada a un circuito externo. El cilindro puede rotar y lleva acoplado en su extremo un puntero que puede girar junto con la bobina; su movimiento está restringido por un resorte.

Plantear el modelo de variables de estado

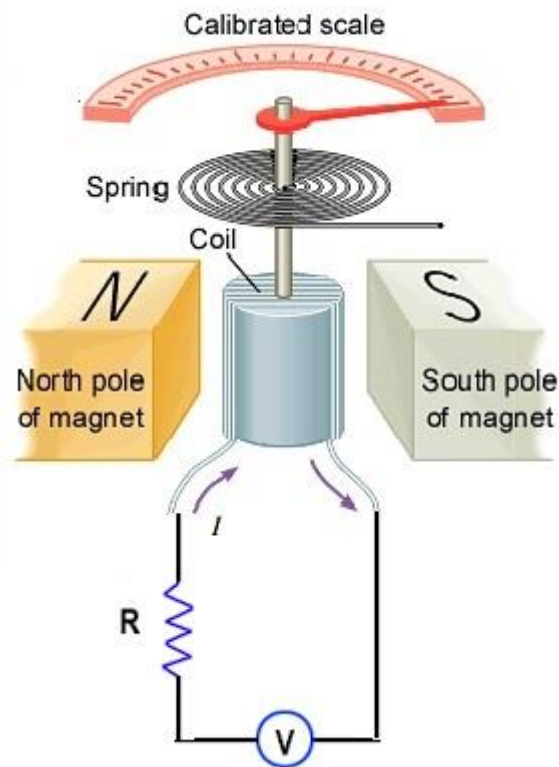


Figura 8

El voltaje inducido e_m sobre un conductor de longitud ℓ que se mueve con una velocidad v en un campo con densidad de flujo B es:

$$de_m = (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{\ell}$$

$$e_m = (v)(B)(\ell)$$

La bobina consiste de N vueltas de longitud l montada sobre un cilindro de radio a y como para inducción sólo interesan las longitudes perpendiculares al campo, la longitud total l_{total} está dada por:

$$l_{total} = 2lN$$

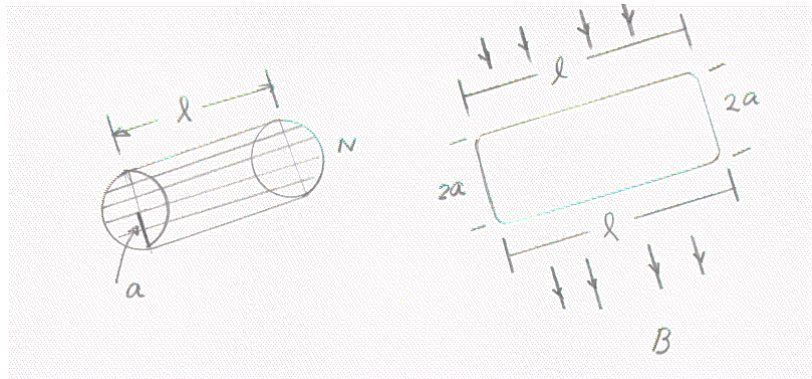


Figura 9

El modelo electro – mecánico equivalente es:

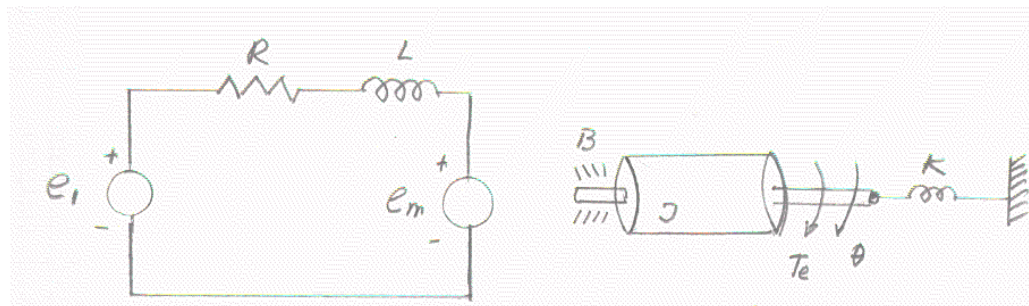


Figura 10

La fuerza electromotriz inducida:

$$e_m = (2lN)Bv$$

La velocidad es $v = r\omega = a\dot{\theta}$

$$e_m = (2NlBa)\dot{\theta}$$

El torque T ejercido sobre un conductor de longitud ℓ que lleva una corriente i en un campo de densidad B es:

$$d\vec{f}_e = i(d\vec{\ell} \times \vec{B})$$

Considerando sólo el sentido perpendicular:

$$f_e = i(2lN)B$$

$$T_e = (2lN)B a i$$

El torque aplicado sobre la bobina:

$$T_e = J\ddot{\theta} + B\dot{\theta} + K\theta$$

De la ley de Kirchoff de voltaje en el circuito RL:

$$e_i(t) = R i + L \frac{di}{dt} + e_m$$

Reemplazando T_e y e_m

$$(2N)B a i = J\ddot{\theta} + B\dot{\theta} + K\theta$$

$$e_i(t) = R i + L \frac{di}{dt} + (2NBa)\dot{\theta}$$

Modelo con tres variables de estado θ , ω y i .

$$\begin{aligned}\dot{\theta} &= \omega \\ \dot{\omega} &= \frac{-k}{J}\theta - \frac{B}{J}\omega + \left(\frac{2NBa}{J}\right)i \\ \dot{i} &= -\left(\frac{2NBa}{L}\right)\omega - \frac{R}{L}i + \frac{1}{L}e_i(t)\end{aligned}$$

Si se puede asumir que el efecto de la inductancia es despreciable, se pasa a un sistema de segundo orden:

$$i = \frac{1}{R} \left[e_i(t) - (2NBa)\dot{\theta} \right]$$

reemplazando en la primera ecuación:

$$\begin{aligned}J\ddot{\theta} + B\dot{\theta} + K\theta &= \alpha i \\ J\ddot{\theta} + B\dot{\theta} + K\theta + \frac{\alpha^2}{R}\dot{\theta} &= \frac{\alpha}{R}e_i(t)\end{aligned}$$

Donde $\alpha = 2NBa$ representa el efecto del acople electromecánico. La ecuación es de un sistema de segundo orden:

$$\ddot{\theta} + \left(\frac{B}{J} + \frac{\alpha^2}{JR}\right)\dot{\theta} + \frac{K}{J}\theta = \frac{\alpha}{JR}e_i(t)$$

Comparando con la ecuación característica de un sistema de segundo orden:

$$S^2 + 2\xi\omega_n S + \omega_n^2 \Rightarrow \omega_n = \sqrt{\frac{k}{J}}$$

$$\xi = \frac{1}{2\sqrt{\frac{K}{J}}J} \left(B + \frac{\alpha^2}{R} \right) = \frac{1}{2\sqrt{JK}} \left(B + \frac{\alpha^2}{R} \right)$$

La frecuencia de oscilación ω_n depende de los componentes mecánicos K/J y el amortiguamiento involucra a los elementos disipativos R y B y el coeficiente de acople electromagnético.

La sensibilidad del galvanómetro en estado estable y asumiendo un voltaje $e_i(t) = E$ es:

$$\frac{K}{J}\theta_{ss} = \frac{\alpha}{JR}E$$

$$\theta_{ss} = \frac{\alpha}{KR}E$$

$$\frac{\theta_{ss}}{E} = \frac{\alpha}{KR} = \frac{2NlaB}{KR}$$

Para aumentar la sensibilidad se debe aumentar B , intensidad del campo magnético, y se debe reducir K (rigidez del resorte) o la resistencia eléctrica R .

El modelo de estado como sistema de segundo orden:

$$\dot{\theta} = \omega$$

$$\dot{\omega} = -\frac{K}{J}\theta - \left(\frac{B}{J} + \frac{\alpha^2}{JR}\right)\omega + \frac{\alpha}{JR}e_i(t)$$

Solenoide^{2,3}.

Un solenoide consiste en una bobina de alambre dentro de la cual un pistón (o plunger) de hierro se puede deslizar suavemente. Cuando la corriente fluye el pistón es atraído hacia la bobina. Desde el puerto eléctrico la bobina presenta un comportamiento inductivo, modificado por la posición X del pistón. Desde el puerto

² Karnopp D.C. et al. Systems Dynamics. 4th Edition. Hoboken, NJ., John Wiley & Sons. 2006

³ Johnson Electric. Ledex Solenoids – Technical Data

mecánico la fuerza F dependerá de la posición X del pistón, similar a la relación existente en un resorte y de las variables eléctricas.

$$i = i(\varphi, X) ; F = F(\varphi, X)$$

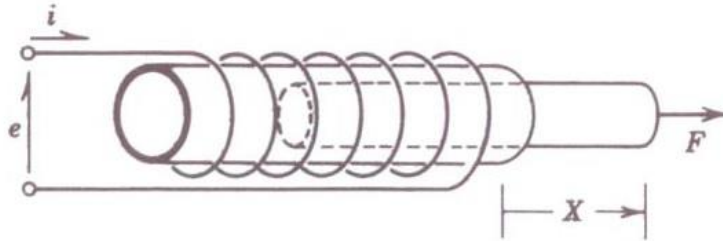


Figura 11

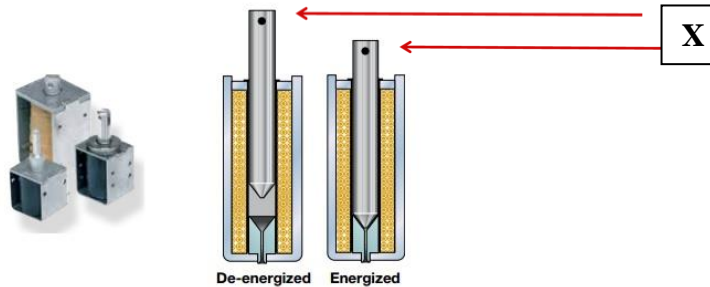


Figura 12

Asumiendo que la resistencia de pérdidas se modela externamente el aumento en la energía almacenada en el campo magnético será:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \text{Energía} \\ \text{Eléctrica} \\ \text{de Entrada} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \text{Energía} \\ \text{Mecánica} \\ \text{de Salida} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \text{Aumento} \\ \text{en la Energía} \\ \text{Almacenada} \\ \text{en el campo} \\ \text{Magnético} \end{bmatrix} \\ E &= E_0 + \int_0^t (ie + FV)dt \\ &= E_0 + \int_{0,0}^{\varphi,X} id\varphi + FdX \end{aligned}$$

Donde la fuerza F se definió positiva en el sentido positivo de X . Si se asume energía inicial nula:

$$i = \frac{\partial E}{\partial \varphi}; F = \frac{\partial E}{\partial X}$$

$$\frac{\partial i}{\partial X} = \frac{\partial^2 E}{\partial X \partial \varphi} = \frac{\partial F}{\partial \varphi}$$

Aunque la inductancia es función de X, en el puerto eléctrico se puede asumir comportamiento lineal:

$$\varphi = L(X)i$$

Cuando la corriente y el flujo sean nulos, la fuerza sobre el pistón también debe ser nula y X debe estar en una posición relajada, \bar{X} para $\varphi = 0$; a partir de la cual se definirá el desplazamiento. Si no hay cambio en la posición del vástago, sólo se almacena energía eléctrica:

$$E(\varphi, X) = \int_0^\varphi \frac{\varphi}{L(X)} d\varphi = \frac{\varphi^2}{2L(X)} = \frac{L(x)i^2}{2}$$

La variable mecánica de salida de interés, F es:

$F = \frac{\partial E}{\partial X} = \frac{\varphi^2}{2} \frac{d[L(X)]^{-1}}{dX} = -\frac{1}{2} \left(\frac{\varphi}{L(X)} \right)^2 \left[\frac{dL}{dX} \right]$	10
---	----

La fuerza depende del cuadrado de la corriente de entrada y del gradiente de la inductancia respecto al desplazamiento del pistón (también llamado "stroke"). La característica del elemento es no lineal, tanto en las variables eléctricas como en las mecánicas.

Los solenoides se pueden excitar con voltaje DC o AC. El ejemplo siguiente analiza el caso DC.

Ejemplo 3⁴ El solenoide se puede modelar inicialmente por un circuito RL lineal. Después se pueden ir adicionando los efectos no lineales. Se calculará la fuerza que se desarrolla en el pistón.

R representa la resistencia de pérdidas de la bobina y estará dada por:

⁴ Paul H. Schimpf. A Detailed Explanation of Solenoid Force. Int. J. on Recent Trends in Engineering and Technology, Vol. 8, No. 2, Jan 2013.

$$R = \rho \frac{l}{a};$$

ρ resistividad, l longitud y a area de la sección transversal

Todos son parámetros del alambre y, dependientes del material y AWG

L es la inductancia de la bobina y está dada por:

$$L = \frac{\mu N^2 A}{l};$$

μ permeabilidad del piston, N número de vueltas;

A área de la sección transversal del orificio de la bobina; l longitud del cable.

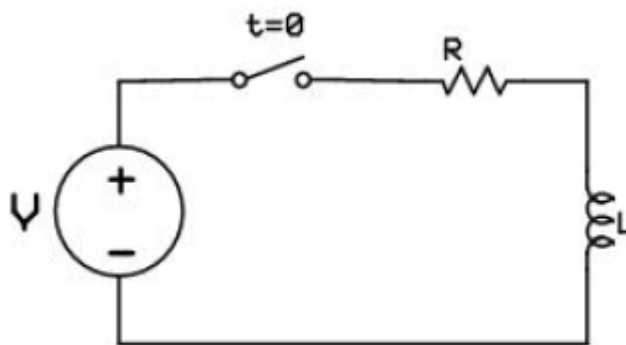


Figura 13

No hay condiciones iniciales, el voltaje DC de alimentación, de amplitud V , se conecta en $t = 0$.

El voltaje y la corriente en este circuito RL están dados por:

$$V_L = V e^{-t/\tau} \text{ y } I_L = \frac{V}{R} (1 - e^{-t/\tau})$$

$\tau = \frac{L}{R}$ es la constante de tiempo. El valor final de la corriente en la inductancia es :

$$I_f = \frac{V}{R}$$

La potencia instantánea es el producto de voltaje y corriente:

$$P_L = I_L V_L = \frac{V^2}{R} (e^{-t/\tau} - e^{-2t/\tau})$$

La energía requerida para alcanzar el estado estable de la corriente en la inductancia:

$$E_L = \int_0^{\infty} P_L dt = \int_0^{\infty} \frac{V^2}{R} (e^{-t/\tau} - e^{-2t/\tau}) dt = \frac{L}{2} \left(\frac{V}{R} \right)^2$$

La fuerza que se desarrolla en el pistón esta dada por la ecuación 60 y es necesario expresar la inductancia en función de la posición del pistón, x .

Se puede desarrollar la siguiente aproximación, l es el máximo recorrido del pistón o "stroke"

Cuando $x = 0$ todo el pistón metálico está dentro del arrollamiento de la bobina y la permeabilidad será máxima:

$$L(0) = \frac{(\mu_r \mu_0) N^2 A}{l}$$

Cuando $x = l$, todo el piston esta extendido (stroke) y el núcleo de la bobina es aire:

$$L(l) = \frac{(\mu_0) N^2 A}{l}$$

(Modelo aproximado que desprecia las no linealidades que se presentan en el campo en la frontera entre aire y el metal del pistón).

La inductancia es máxima para $x = 0$ y mínima para $x = l$. Disminuye monótonamente pero un modelo exacto depende de la construcción del solenoide y requiere desarrollar un modelo espacial (ecuaciones diferenciales parciales).

Para el objetivo del ejemplo es posible plantear un modelo de caída exponencial:

$$L(x) = L_0 e^{-\left(\frac{\alpha}{l}\right)x}$$

Debe satisfacer los valores extremos:

$$L(0) = L_0$$

Y

$$L(l) = L_0 e^{-\left(\frac{\alpha}{l}\right)l} = \frac{(\mu_0)N^2 A}{l} = \frac{L_0}{\mu_r}$$

$$e^{-\alpha} = \frac{1}{\mu_r} \rightarrow \alpha = \ln(\mu_r)$$

Este es el límite superior de α , si se toma un valor menor que este, pero mayor que uno, se garantiza que el pistón metálico salga efectivamente de la bobina.

$$L(x) = L_0 e^{-\left(\frac{\ln \mu_r}{l}\right)x}$$

El gradiente de cambio de la inductancia respecto a x:

$$\frac{dL(x)}{dx} = L_0 \frac{de^{-\left(\frac{\ln \mu_r}{l}\right)x}}{dx} = -L_0 \left(\frac{\alpha}{l}\right) e^{-\left(\frac{\alpha}{l}\right)x}$$

La energía necesaria para alcanzar el estado estable:

$$E_L = \frac{1}{2} \left(\frac{V}{R}\right)^2 L(x)$$

La fuerza en el pistón:

$$F = \frac{\partial E}{\partial X} = \frac{1}{2} \left(\frac{V}{R}\right)^2 \frac{dL(x)}{dx}$$

$$F = -\frac{1}{2} \left(\frac{V}{R}\right)^2 L_0 \left(\frac{\alpha}{l}\right) e^{-\left(\frac{\alpha}{l}\right)x}$$

Se va a expresar la fuerza en términos útiles para el cálculo y análisis de un solenoide.

Del perfil de la bobina se obtiene que para el calculo de la longitud total de cable el radio que se debe emplear es r_a .

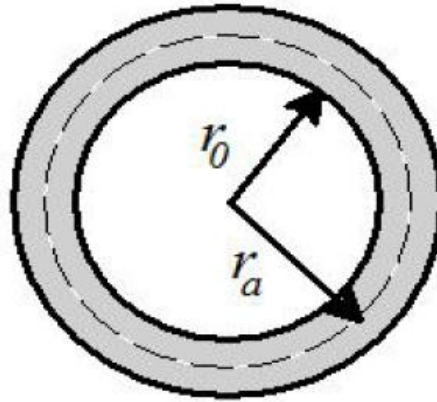


Figura 14

Como la tabla AWG ya da el valor de resistencia por metro de cable. La resistencia total del alambre es:

$$R = (2\pi r_a)N\rho_a$$

Y el área de la sección transversal de la bobina es:

$$A = \pi r_0^2$$

La fuerza F:

$$F = -\frac{V^2(\mu_r\mu_0)}{8\pi(\rho_a)^2}\left(\frac{r_0}{r_a}\right)^2 \alpha e^{-\left(\frac{\alpha}{l}\right)x}$$

¿Como se compara este resultado aproximado con las características de un solenoide?

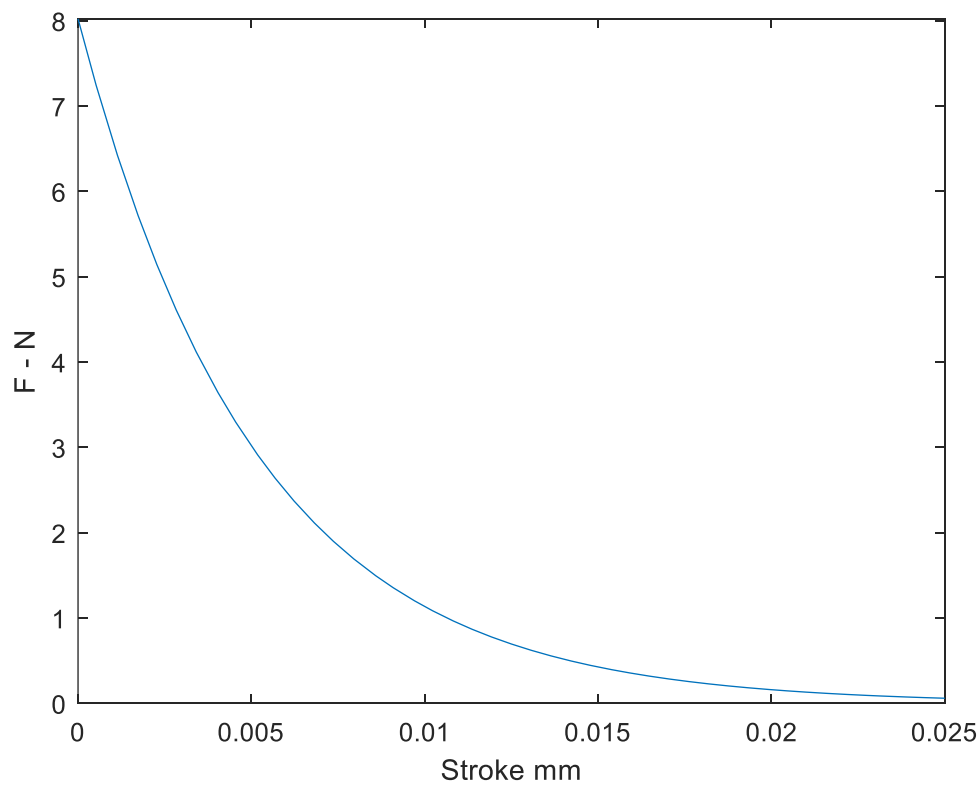
Alambre de cobre, AWG 30, Diámetro: 0.255 mm; Área: 0.0509 mm² ; Resistencia por metro $\rho_a = 338.6 \frac{m\Omega}{m}$, Capacidad de corriente 10A.

N = 572, stroke l = 27mm, radio interno $r_0 = 2,3$ mm, $r_a = 4.5$ mm

Se obtiene:

$R = 5.47$; $L(o) = 17.1$ mH; $L(l) = 0.34$ mH;

Con 12 Vdc de alimentación, se obtiene una Fuerza máxima de 8 N para 0 stroke. La corriente máxima es de 2.2 A y la potencia eléctrica es de 26.3 W. Esta va a ser una limitación crítica en el dimensionamiento de un solenoide, por el calentamiento del bobinado.



```
%Capitulo 5 Ejemplo 17 solenoide
clc
clear all
close all
syms x
%Data
V = 12; mur =50; muo= 4*pi*1e-7;
%data cable
rad0 = 2.3e-3; rada=4.5e-3; N = 572; Resm = 338.6e-3;
logc = 2*pi*rada*N;
R =Resm*logc
%Calculo inductancias
ls =20e-3
A = pi*(rad0^2)
Lo = (mur*muo)*(N^2)*A/ls
Lext = Lo/mur
%Calculo fuerza
Corr = V/R
Potres =R*(Corr)^2
alfa = log(mur)
Far = ((V)^2/(2*R^2))*(alfa*Lo/ls)
Exlon= exp((-alfa/ls)*x);
Force = Far*Exlon;
fplot(Force,[0 25e-3]), ylabel 'F - N', xlabel 'Stroke mm'
```

Que otras variables, no incluidas en el modelo, ¿afectan el comportamiento del solenoide?

Flujo magnético: las líneas de flujo magnético se transmiten a través del núcleo metálico del pistón (también llamado "plunger") y el aire entre este y la bobina: la fuerza es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre los polos; por lo tanto, esta distancia se debe mantener lo más corta posible.

Amperio-vuelta: el número de vueltas del alambre de cobre, la magnitud de la corriente y la permeabilidad del circuito magnético determinan la intensidad del flujo magnético dentro del solenoide.

Saturación: la curva B (Intensidad de flujo en Wb/m^2) vs. H (intensidad del campo magnético en A.vuelta/m) muestra los fenómenos de saturación e histéresis. Más allá del punto b aumentos en H no producen aumento en B; la fuerza de salida no aumenta, sólo se obtiene mayor disipación de potencia eléctrica y calentamiento.

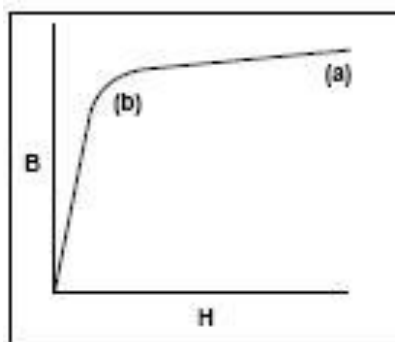


Figura 15

El límite de temperatura del arrollamiento limita la potencia de entrada. El uso de excitación constante limita el número de Amperio-vuelta usables y por lo tanto la fuerza de salida.

Resistance (@20°C)	Ref # Turns	VDC (Nom)	VDC (Nom)	VDC (Nom)	VDC (Nom)
4.12	916	6	8.5	12	19
17.26	1783	12	17	24	38
65.76	3601	24	34	48	76
253.51	6930	48	68	96	152
1538	16548	120	161	229	361

Figura 16

Ciclo útil: está determinado por la relación:

$$Duty\ cycle = \frac{t_{ON}}{t_{ON} + t_{OFF}}$$

El ciclo útil determina la potencia de entrada, el calor disipado y la cantidad de fuerza disponible.

Performance

Maximum Duty Cycle	100%	50%	25%	10%
Maximum ON Time (sec) when pulsed continuously	∞	50	16	6
Maximum ON Time (sec) for single pulse	∞	450	172	53
Watts (@ 20°C)	8.5	17	34	85
Ampere Turns (@ 20°C)	1317	1866	2634	4170

Figura 17

A la misma bobina se le puede entregar una potencia eléctrica de 8.5 W para excitación constante (ciclo útil 100%) y 85 W con ciclo útil del 10% (6 s por cada minuto): la capacidad de manejo de potencia se multiplica por 10 cuando el ciclo útil se reduce al 10%

Tiempo máximo de encendido:

Para una potencia y un ciclo útil dados las bobinas tienen un tiempo encendido máximo: para un ciclo útil del 25% con excitación pulsatoria periódica puede estar ON hasta 16 s cada 64 s, pero si la misma bobina se mantiene encendida durante 30 s cada 120 s (ciclo útil de 25%) se quema: su tiempo ON excede 16 s.

Typical Force @ 20°C

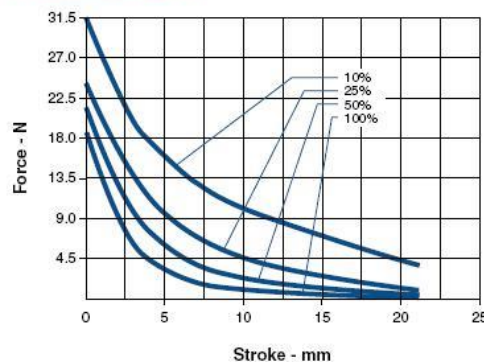


Figura 18

Para excitación por pulso sencillo puede estar ON hasta 172 s de un intervalo de 688 s, con una potencia aplicada de 34 W. La característica de fuerza vs. Corriente de entrada es función del recorrido del pistón (o "stroke") y del ciclo útil de la excitación.

REFERENCIAS

1. CLOSE Charles, FREDERICK Dean and NEWELL Jonathan. *Modeling and Analysis of Dynamic Systems*. 3rd Edition. John Wiley & Sons. 2002.
2. DOEBELIN E.E. *Sistemas de medición e instrumentación*. 5ta Edición. México. McGraw Hill 2005.
3. CHAPMAN Stephen J. *Máquinas Eléctricas*. 4ta Edición. McGraw Hill. 2005
4. DORF Richard and BISHOP Robert. *Modern Control Systems*. 10th Edition. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall. 2005.
5. ERONINI Umez Eronini. *Dinámica de sistemas y control*. México: Thomson Learning. 2001.
6. FITZGERALD A.E, KINGSLEY C., and UMANS S. *Electric Machinery*. 6ta Edition. Boston: McGraw Hill. 2003. Sections 3.1- 3.2.
7. KARNOPP Dean; MARGOLIS Donald and ROSENBERG Ronald. *Systems Dynamics*. 4th Edition. John Wiley & Sons. 2006
8. Franklin G.F; Powell J.D. and Emani naeni A. *Feedback Control of Dynamic Systems*. 4th Edition. Upper Saddle River, NJ. 2006.
9. Damir Zarko. *Fundamentals of Mechanical Components for Electric Drives*. University of Zagreb. 2018
10. Rockwell International Corporation. *Drives Engineering Handbook*. 2004
11. Max Rabiee. Teaching an Undergraduate Electromechanical Course. 2010
12. CANNON Robert H. *Dynamics of Physical Systems*. McGraw Hill. 1967
13. Hakan Gürocak. *INDUSTRIAL MOTION CONTROL*, John Wiley & Sons, Ltd. 2016
14. Paul H. Schimpf. A Detailed Explanation of Solenoid Force. Int. J. on Recent Trends in Engineering and Technology, Vol. 8, No. 2, Jan 2013.

PROBLEMAS

1. Un actuador electromagnético, Figura P1, contiene un solenoide que produce una fuerza magnética proporcional a la corriente que fluye a través de la bobina:

$$f_m = K_s i$$

- a. Plantear las ecuaciones de estado.
- b. Plantear la función de transferencia si la variable de interés de salida es la fuerza sobre la masa M_2 y la entrada es el voltaje E aplicado a la solenoide.

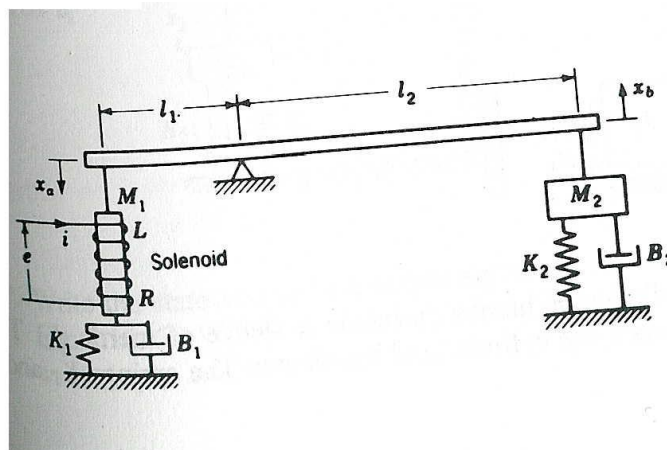


Figura P1⁵

⁵ Dázzo and Houpis Linear control systems análisis and design. 4th Edition.