LA TEORÍA DEL CONTROL AUTOMÁTICO APLICADA AL AREA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

Ing. SATURNINO LEGUIZAMON
Profesor Titular de Servomecanismos
en la F.I.E.E.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo tiene por finalidad presentar al Ingeniero Electricista y al estudiante de Ingeniería Eléctrica un panorama general de las posibilidades que ofrece la Teoría de Control Automático para la resolución de problemas que pueden presentarse en el desempeño de su profesión.

Siendo el Control Automático una ciencia interdisciplinaria y uno de los pilares fundamentales en el desarrollo tecnológico actual, no sería necesario destacar la importancia de su aplicación en una especialidad tal como la Ingeniería Eléctrica; ya que puede ser igualmente útil en cualquier otra disciplina. Sin embargo, debido al hecho de que muchos ingenieros electricistas no han tenido en sus respectivas Carreras un curso de Control Automático (C.A.), ni la posibilidad material de tiempo para mantenerse actualizado, no valoran en su justa medida la real importancia que el C.A. pudiera tener en su profesión, ni intentan su aplicación por considerar que este es un tema vedado sólo a especialistas en electrónica y/o para ser aplicado en países altamente tecnificados.

El objetivo de este trabajo es dar unas breves nociones de C.A. y motivar al ingeniero electricista para que profundice más en este tema, en la creencia de que su conocimiento redundará en un decidido apoyo a la aplicación de esta ciencia y por lo tanto en el desarrollo tecnológico de nuestro país.

1. TEORÍA DEL CONTROL AUTOMÁTICO

1.1. — Concepto General

El Control Automático (C.A.) tiene por finalidad lograr que la saudade un sistema a controlar tenga un **determinado comportamiento,** y que dicho comportamiento se mantenga en el tiempo, aún cuando sobre el sistema actúen **perturbaciones** que tiendan a apartarlo de él.

Este objetivo se logra, por lo general, mediante el empleo de **realimentación;** por eso se puede decir también que el C.A. es la ciencia que estudia el comportamiento de los sistemas realimentados.

Cabe hacer aquí algunas aclaraciones sobre los términos utilizados; en primer lugar, llamamos **"sistema"** a un conjunto de elementos o partes que trabajan en forma conjunta para realizar una tarea o lograr un resultado determinado. Este concepto es muy amplio y es muy utilizado en el área de C.A., y puede tratarse por ejemplo de una simple máquina eléctrica, de un conjunto de máquinas, o un sistema eléctrico de potencia interconectado.

Sistema de **control realimentado** es aquel que posee los medios para medir el resultado de una determinada acción de control, compararlo con el resultado deseado y utilizar la posible discrepancia o error que resulte de esa comparación para corregir la acción de control y así reducir ese error al mínimo. De ahí el nombre de realimentación, ya que se introduce en la entrada del sistema a controlar una acción de control que depende de la "información" del resultado que se tiene a la salida.

Estos sistemas son llamados también sistemas de lazo cerrado; en contraposición a los sistemas que no son realimentados y que se denominan de lazo abierto. Estas denominaciones provienen de la configuración topológica de los sistemas.

La realimentación puede formar parte intrínseca de un sistema o se puede producir a propósito a los efectos de obtener un mejor comportamiento del mismo. Si se desean ampliar estos conceptos pueden consultarse por ejemplo: [1], [2], [3].

A los efectos de clarificar los conceptos vertidos, daremos a continuación un ejemplo de aplicación:

Sea un generador de C.C. de excitación independiente el sistema o planta que se desea controlar. Sea la tensión en bornes V_a la variable de interés que queremos mantener constante frente a variaciones de la carga; llamada por eso también variable controlada o salida.

Consideraremos que la velocidad del motor impulsor permanece **constante.**

La acción o variable de control; o simplemente el "control" será entonces la corriente de excitación del campo inductor I_c.

En la Fig. 1.a. vemos un esquema del circuito, y en 1.b. tenemos la característica externa del generador. De este gráfico sacamos la conclusión que, para un determinado valor de I_c; el voltaje de salida no permanece constante para distintos valores de la corriente de carga, I_a.

Una forma de mejorar el sistema es medir en cada instante la tensión de salida, comparar el valor medido con el voltaje deseado y utilizar el error que resulte de esta comparación para variar le en forma adecuada para que dicho error disminuya o resulte nulo (Fig. 2). Tenemos de esta forma un sistema realimentado que, ajustado de manera apropiada, producirá el resultado esperado.

La Fig. 3 nos muestra el diagrama en bloques del sistema realimentado cuya configuración es la del típico lazo cerrado.

1.2. — Modelos Matemáticos de Sistemas, Variable de Estado

El ejemplo visto en 1.1. constituye un caso particular de sistema a controlar en el cual tenemos una sola entrada y una sola salida. Normalmente estos sistemas son representados por una función de la variable compleja "s", llamada Función de Transferencia. En el caso general tendremos más de una variable de entrada y más de una variable de salida, tenemos entonces lo que se conoce como sistema multivariable. Además, es muy frecuente que exista interacción entre dichas variables; es decir, una entrada afecta a más de una salida y/o una salida es afectada por más de una variable de entrada. Estos sistemas ya no pueden tratarse mediante la función de transferencia sino que exigen otro tipo de representación. La representación actualmente usada en C.A. es la de "variable de estado".

Para no entrar en un rigorismo matemático innecesario para los fines que persigue esta nota, diremos simplemente que se denomina variable de estado a una variable interna del sistema. Esta variable interna está normalmente asociada a los elementos almacenadores de energía que lo integran y que, de alguna manera, representan el "estado" en que se encuentra dicho sistema. Así por ejemplo en circuitos eléctricos podrían considerarse como variables de estado la tensión en los bornes de un condensador o la corriente en una inductancia. En hidráulica podría tratarse por ejemplo del nivel del líquido de un tanque, etc.

La representación mediante variable de estado se hace en el dominio temporal y utiliza vectores y matrices dispuestos en una ecuación diferencial vectorial, cuya solución, cuando existe, permite encontrar la acción de control que satisface los requerimientos del problema. El modelo matemático de un sistema utilizando esta técnica, sería por ejemplo:

$$\dot{x} = f(x, u, t) \tag{1}$$

donde $\dot{x}$, x, u, son vectores; t es el tiempo, un escalar. Siendo:

x ; vector de estado
u ; vector de control
$\dot{x}$; dx/dt

El vector de estado de orden n (n es el orden del sistema a representar) cuya obtención y propiedades no analizaremos aquí, está constituido por n componentes que representan las variables dependientes del problema y que pueden ser por ejemplo: posición, velocidad, presión, humedad, caudal, voltaje, corriente, etc.

El vector de control u, de orden m (para m entradas o acciones de control) está compuesto por m componentes que son todas las variables independientes que pueden actuar sobre el sistema y que afectan el comportamiento del mismo.

Si bien en la expresión (1) sólo figura la primer derivada de x con respecto a t; en el caso general pueden estar presente derivadas de orden superior.

La introducción de la técnica de variable de estado en la modelación de sistemas físicos posibilita la representación matemática de sistemas complejos, sean estos lineales o no lineales, variantes o invariantes en el tiempo, etc. Esto ha permitido el desarrollo de métodos especiales para el análisis y el control de grandes sistemas eléctricos de potencia. [4].

1.3. — **Control Optimo**

La obtención del comportamiento deseado de un sistema de control puede hacerse, por lo general, de diferentes maneras. En algunos casos suelen existir infinitas soluciones para un dado problema de control. Lógicamente que, según un determinado criterio, algunas soluciones serán mejores que otras; y de éstas habrá una que es la mejor de todas. Esta solución es la "óptima" para ese determinado criterio. Si consideramos otro criterio para medir la "bondad" o "mérito" de la solución, puede ser que ese mismo control no sea ya el óptimo. Precisamente la búsqueda de esa "mejor" solución es el problema del control óptimo.

En otras palabras, el control óptimo tiene por objeto buscar un control que haga que el sistema o planta a controlar tenga la respuesta deseada, y que a su vez, dicho control optimice (maximice o minimice) una funcional llamada "de costo" o también función objetivo. Todo esto debe hacerse teniendo en cuenta las restricciones impuestas por el sistema físico.
Matemáticamente:

Sea: $$f(x,\ x, u, t) = O \qquad (2)$$
la ecuación del sistema físico que representa la dinámica de la planta.

Sea $$\int_{to}^{tf} L(x, u, t)\, dt \qquad (3)$$

la función objetivo a minimizar en el intervalo t_o, t_f; la cual expresa en términos matemáticos el objetivo buscado por el diseñador del control.

Sea: $$u_{min} \leq u \leq u_{max} \qquad (4)$$

$$x_{min} \leq x \leq x_{max} \qquad (5)$$

las restricciones impuestas por el sistema a controlar.
Encontrar el control óptimo u que minimice la funcional de costo (3) sujeto a las restricciones dadas por (2), (4) y (5).

Existen diferentes métodos que permiten encontrar la solución a este problema; entre los cuales podemos citar: [5], [6], [7]

a) Cálculo de Variaciones
b) Principio del mínimo de Pontryagin
c) Programación dinámica.

La aplicación de estos métodos generalmente no es sencilla, requiriendo muchas veces la utilización de una computadora digital para tal fin.

La elección del método depende del tipo y magnitud del problema a resolver. A los efectos de aclarar y completar los conceptos vertidos, daremos a continuación una breve descripción de uno de estos métodos, el cálculo de variaciones, que es el método más antiguo en aplicación y que, en alguna medida, se puede considerar el fundamento para los otros dos métodos que se han nombrado aquí.

1.3.1. — Método del cálculo de variaciones

Atendiendo a la finalidad del presente trabajo, sólo se darán algunos conceptos fundamentales de este método, sin entrar a considerar su aplicabilidad, ni los fundamentos matemáticos del mismo.

El cálculo de variaciones estudia los métodos que permiten encontrar el máximo (o mínimo) de una funcional.

Se denomina funcional a una magnitud variable cuyos valores dependen de una o más funciones.

A los efectos de simplificar trataremos la solución de una clase sencilla de problemas que pueden resolverse mediante el cálculo de variaciones.

Sea la funcional:

$$J(x) = \int_{to}^{tf} L\left(x, \dot{x}\right) dt \qquad (6)$$

Determinar la función x(t) que extremiza J.

El cálculo variacional nos dice que x(t) será extremo de J si se satisface la ecuación de Euler:

$$\frac{\partial L}{\partial x} - \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}}\right) = 0 \qquad (7)$$

Pero, como ocurre en los problemas de control, las funciones que producen el mínimo o máximo de J están sujetas a una serie de restricciones o condiciones impuestas por el problema físico. Así por ejemplo, si se consideran n restricciones:

$$f_i(x, \dot{x}) = 0 \quad ; \quad i = 1, 2, \ldots, n \qquad (8)$$

Entonces el problema se resuelve utilizando los multiplicadores de Lagrange, los cuales son funciones de t que habrá que determinar y que permiten plantear la ecuación auxiliar:

$$F = L\left(x, \dot{x}\right) + \sum_{i=1}^{n} \lambda_i(t).f_i\left(x, \dot{x}\right) \qquad (9)$$

a la cual se le aplica ahora la ecuación de Euler y donde los λ_i (t) son los multiplicadores de Lagrange.

De esta manera, el problema consiste ahora en encontrar la función x(t) y los n funciones λ_i (t) a partir de un sistema de n+1 ecuaciones dadas por (7) y (8). Este caso se conoce como el problema general de Lagrange. Si en cambio las condiciones impuestas a x(t) son de la forma:

$$\int_{t_0}^{t_f} L_i\left(x,\dot{x}\right) dt = K_i = cte.\;\; i=1, 2, \dots, n \tag{10}$$

el problema es conocido como problema isoperimétrico y se resuelve mediante el planteo de la siguiente función auxiliar:

$$F = L\left(x,\dot{x}\right) + \sum_{i=1}^{n} \lambda_i\, L_i\left(x,\dot{x}\right) \tag{11}$$

donde los multiplicadores de Lagrange son ahora constantes; es decir independiente de t. De la misma forma que en el problema anterior, la función x(t) y los n multiplicadores indeterminados de Lagrange son encontrados mediante la aplicación de las ecuaciones (7) y (10).

Sea por ejemplo: encontrar la función x(t) que hace extrema la funcional

$$J(x) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \left[\dot{x}(t)^2 - x(t)^2\right] dt \tag{12}$$

y que satisfaga las condiciones de contorno:

$$x(0) = 0 \qquad y \qquad x(\pi/2) = 1$$

Aplicando la ecuación de Euler al integrando de (12) tenemos:

$$\frac{\partial L}{\partial x} = -2x \qquad ; \qquad \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}}\right) = 2^0 x^0$$

Luego:

$$\ddot{x}^*(t) + x^*(t) = 0 \tag{13}$$

Ecuación diferencial de coeficientes constantes cuya solución es:

$$x^*(t) = C_1 \cos t + C_2 \operatorname{sen} t$$

Aplicando las condiciones de contorno, obtenemos que

$$C_1 = O \text{ y } C_2 = 1$$

luego la función solución es:

$$x^*(t) = \operatorname{sen} t \qquad (14)$$

Como en este ejemplo no existe ninguna restricción no es necesario la aplicación de los coeficientes de Lagrange.

2. — APLICACIÓN DE LA TEORÍA DEL C.A. EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

2.1. — Area de Máquinas Eléctricas

Las modernas técnicas de C.A. pueden aplicarse en el control de máquinas eléctricas gracias al avance tecnológico producido en el campo de los componentes semiconductores. Esto ha hecho posible que los mismos puedan manejar corrientes y voltajes relativamente grandes; lo suficiente para controlar la mayoría de las máquinas eléctricas que se utilizan en la industria, en una manera prácticamente a voluntad.

Precisamente este hecho; el de poder controlar una máquina en forma arbitraria hace necesario el pensar cuál es la "mejor" forma de hacerlo, y aquí surge la necesidad de utilizar los conocimientos de control óptimo para poder optimizar el comportamiento de las mismas.

Es sabido que la antigua disposición Ward-Leonard, utilizada para obtener velocidad o par variable en una máquina de C.C. ha sido reemplazada hoy en día por elementos de estado sólido.

El control de velocidad de motores de corriente alterna, utilizando máquinas de anillos rozantes, con una voluminosa reactancia adicional, ha sido reemplazada también por los mismos dispositivos.

Nuevas técnicas de construcción, junto con los dispositivos de estado sólido han dado lugar al desarrollo de máquinas eléctricas con características especiales tales como: motor de C.C. con rotor impreso, motor de C.C. sin escobillas, motores paso a paso, etc.

La introducción de técnicas modernas no sólo está dirigida a la reducción de peso y tamaño en el control de la maquinaria, sino que también se suelen obtener ventajas adicionales tales como simplicidad y seguridad en la operación de las mismas. En algunos casos se obtiene el reemplazo total de la máquina; por ejemplo el control de velocidad de una máquina de C.A. puede muy bien realizarse utilizando un ciclo-convertidor y un motor de C.A. asincrónico común de jaula de ardilla, en lugar de utilizar las onerosas máquinas de anillos rozantes.

Es lógico suponer que al trabajar las máquinas eléctricas en otras condiciones, por ejemplo: frecuencia variable, excitación pulsante, etc., exige una revisión del diseño de las mismas tendientes a mejorar su rendimiento y a lograr una eficiente operación. Se abre aquí un vasto campo de posibilidades para el ingeniero electricista.

El control de maquinaria eléctrica mediante semiconductores, exige, lógicamente, el conocimiento de circuitos con semiconductores; pero exige también la operación correcta del conjunto circuito-máquina-carga, que requiere con frecuencia la utilización de las teorías de C.A. La aplicación de estas teorías es posible si se conoce el modelo matemático del sistema a controlar, y he aquí que los modelos matemáticos utilizados normalmente por los ingenieros electricistas no son suficientes ya que por lo general se trata de modelos de aplicación en condiciones estáticas. Debe utilizarse ahora, en cambio, un modelo que refleje el comportamiento dinámico de las máquinas a controlar.

Si bien no existe, por el momento, una teoría unificada que permita la obtención de modelos matemáticos de sistemas en forma sistemática, existen en el área de Control distintas técnicas que, aplicadas adecuadamente, permiten modelar los sistemas de control. [8]

2.1.1. — **Problema de Control óptimo en Máquinas Eléctricas**

Daremos a continuación un ejemplo de aplicación de la teoría de C.A. a la solución de un problema que puede presentarse en el control de maquinaria eléctrica. Dicho problema será resuelto' mediante la aplicación del método de cálculo de variaciones; es decir, se aplicará lo visto en el apartado 1.3.1.

Es sabido que el ángulo de rotación Ø de un motor de C.C. controlado por armadura está relacionado con la corriente de armadura i_a por la ecuación:

$$H \frac{d^2Ø}{dt^2} + f \frac{dØ}{dt} = K_i \, \Theta i_a \qquad (15)$$

donde: H = momento de inercia del rotor más carga del motor

f = coeficiente de fricción viscosa

K_i = constante de proporcionalidad

θ = flujo magnético

i_a = corriente de armadura

$\varnothing$ = posición angular del eje

Para simplificar el problema supondremos que la fricción es cero; $f=0$ y que el flujo θ = cte. Luego la expresión (15) queda:

$$\frac{d^2\varnothing}{dt} = K\, i_a \tag{16}$$

donde: $K = K_i\, \theta/H$ = constante

Utilizando la nomenclatura normalmente empleada en C.A. llamaremos $u = K \cdot i_a$ acción de control y $\varnothing$ = variable de estado = x

Entonces:

$$\frac{d^2x}{dt} = u \tag{17}$$

es la ecuación que modela nuestro sistema físico, que en este caso es un motor de C.C. controlado por armadura.

Plantearemos el problema de la siguiente manera:

Se desea que el eje del motor pase de una posición dada: x_0 en t a otra posición final x en t consumiendo la mínima potencia.

La funcional de costo tendrá entonces la forma:

$$J = \int_{t_0}^{t_f} u^2\,(t)\, dt \tag{18}$$

Supondremos que

$$\dot{x}(0) = \dot{x}(t_f) = 0 \text{ y} \qquad t_o = 0 \tag{19}$$

y que además, se sabe que:

$$\int_{t_0}^{t_f} \dot{x}(t) \; dt = \varnothing_a \tag{20}$$

O sea, el ángulo de rotación en el intervalo considerado $t_f - t_0$ es igual a $\varnothing_a$.

Antes de aplicar el método haremos un cambio en la notación, llamando:

$$x = x_1$$

$$\dot{x} = \dot{x}_1 = x_2$$

Entonces la (17) queda:

$$\dot{x}_2 = u \tag{21}$$

con $\qquad x_2(0) = x_2(t_f) = 0$

y además

$$\int_0^{t_f} x_2 \, (t) \, dt = \varnothing_a \tag{22}$$

La funcional a ser minimizada es:

$$J = \int_0^{t_f} u^2 \; (t) \; dt = \quad \int_0^{t_f} (\dot{x}_2)^2 \; dt \tag{23}$$

Considerando la funcional (23) con las restricciones (21) y (22) tenemos planteado un problema en el cálculo variacional del tipo isoperimétrico en el cual la función auxiliar tiene la forma ya expresada en (11):

$$F = L + \lambda_1 L_1 = (\dot{x}_2)^2 + \lambda_1 x_2$$

De la cual obtenemos:

$$\frac{\partial F}{\partial x_2} = \lambda_1 \qquad ; \qquad \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial F}{\partial \dot{x}_2}\right) = 2\ddot{x}_2$$

Entonces, la ecuación de Euler nos da: $\lambda_1 - 2\ddot{x}_2 = 0$ ó $\ddot{x}_2 = \frac{\lambda_1}{2}$ de donde extraemos que:

$$\dot{x}_2 \frac{\lambda_1}{2} t + C_1 = u \tag{24}$$

$$x_2 = \frac{\lambda_1}{4} t^2 + C_1 t + C_2 \tag{25}$$

Aplicando las condiciones de contorno tenemos:

$$x_2(0) = C_2 = 0$$

$$x_2(t_f) = \frac{\lambda_1}{4} t_f^2 + C_1 t_f = 0 \tag{26}$$

De la condición (22) tenemos que:

$$\int_0^{t_f} x_2(t)\,dt = \frac{\lambda_1}{12} t_f^3 + \frac{C_1}{2} t_f^2 + C_2 t = \emptyset_a$$

o sea:

$$\frac{\lambda_1}{12} t_f^3 + \frac{C_1}{2} t_f^2 = \emptyset_a \tag{27}$$

De (26) y de (27) podemos encontrar los valores de λ_1 y de C_1 que son:

$$\lambda_1 = -\frac{24\emptyset_a}{t_f^3} \qquad y \qquad C_1 = \frac{6\emptyset_a}{t_f^2}$$

sustituyendo en (24) y (25) tenemos que:

$$u^*(t) = \frac{6\emptyset_a}{t_f^2} - \frac{12\,\emptyset_a}{t_f^3} t \tag{28}$$

y $$x_2^*(t) = \frac{6\,\emptyset_s}{t_f^2}\,t - \frac{6\,\emptyset_s}{t_f^3}\,t^2 \qquad (29)$$

La expresión (28) nos da el control óptimo u*, o sea la forma en que debe variar la corriente de armadura para que la potencia consumida en el intervalo considerado sea mínima. La (29) nos la forma en que varía la velocidad al aplicar u*(t). Las Figs. 4 y 5 representan un gráfico de u* y de x_2* respectivamente.

De la Fig. 4 vemos que la corriente i_a debe comenzar en t = 0 en un determinado valor positivo y luego disminuir linealmente con el tiempo hasta un valor cero para posteriormente tornarse negativa a los efectos de frenar el rotor, terminando en un determinado valor negativo t = t_f.

Si hiciéramos variar a i_a de otra forma; por ejemplo como lo indicado por la línea punteada en Fig. 4 comprobaríamos que el valor que toma J(x) en (18) es mayor que el logrado con u*.

2.2. — **Control de Sistemas Eléctricos de Potencia**

Sería innecesario destacar la importancia que el C.A. ha tenido y tiene en el control de los sistemas eléctricos de potencia, pues es sabido que, por antigua que sea una central, la misma dispone de dispositivos de control que, en forma automática regulan parámetros de interés; tales como: frecuencia, tensión, potencia, etc.

El suministro de vapor a la turbina de una central térmica no podría hacerse en forma correcta sin un funcionamiento adecuado de la caldera que produce dicho combustible, y éste no podría llevarse a cabo sin la intervención directa del C.A. en el control de parámetros tan importantes como: presión, temperatura, nivel, caudal, etc.; tareas que deben hacerse en forma automática ya que sería prácticamente imposible, además de peligroso, efectuar dicha operación con la sola intervención humana.

El control de los parámetros de una central eléctrica aislada, con una sola carga es relativamente simple. Pero no es éste el caso que suele presentarse en la práctica. Por otro lado, las exigencias cada vez mayores por parte del usuario, tanto en cantidad, calidad y seguridad del servicio eléctrico suministrado, hacen necesario por parte del proveedor del mismo, trabajar con sistemas interconectados que satisfagan tales requerimientos. Surge aquí la necesidad ireemplazable del C.A. ya que: por un lado para poder interconectar sistemas de energía, estos deben tener características tales que hagan posible dicha interconexión (por ejemplo: igualdad de frecuencia, fase y niveles de tensión). Por otro lado, una vez interconectado el sistema, se deben mantener en todo instante las características requeridas que demandaron dicha interconexión.

Un sistema interconectado es un ejemplo típico de sistema de control multivariable e interactuante; es decir, cuando se pretende modificar una variable en una de las centrales del sistema, puede resultar la modificación de otra variable en otro u otros puntos del mismo.

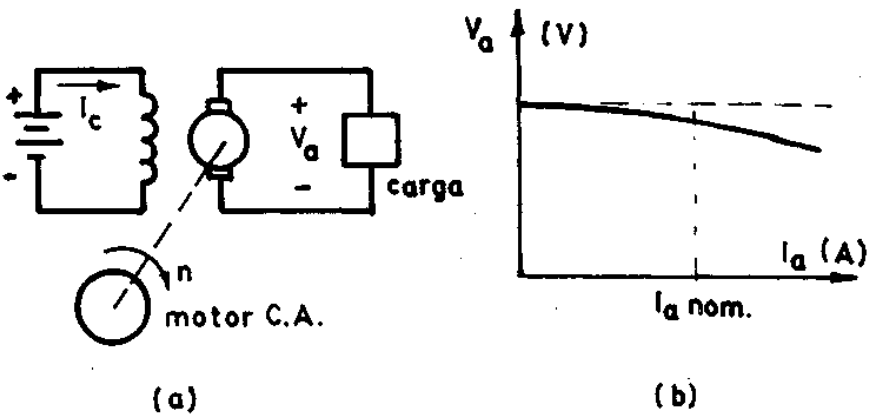
La magnitud y complejidad de un sistema de control de esta naturaleza es tan formidable, y las constantes de tiempo involucradas tan pequeñas, que se hace necesario la incorporación de computadoras digitales de gran velocidad para lograr el control del mismo. [9], [10], [11].

3. - CONCLUSIONES

Como se puede apreciar, el control de sistemas eléctricos, ya sean sistemas eléctricos de potencia o de la maquinaria eléctrica, aplicando modernas tecnologías y teorías de C.A., no es una tarea simple, ni para el ingeniero electrónico ni para el ingeniero electricista. Si bien ambos pueden encarar su solución por separado, es mucho más provechoso, en muchos casos, que dicha operación se realice en forma conjunta, trabajando en equipo. Es el ingeniero electricista, a quien van dirigidas estas líneas, quien debe tratar de adquirir los conocimientos suficientes como para poder utilizar las modernas herramientas de trabajo con que se cuenta hoy en día.

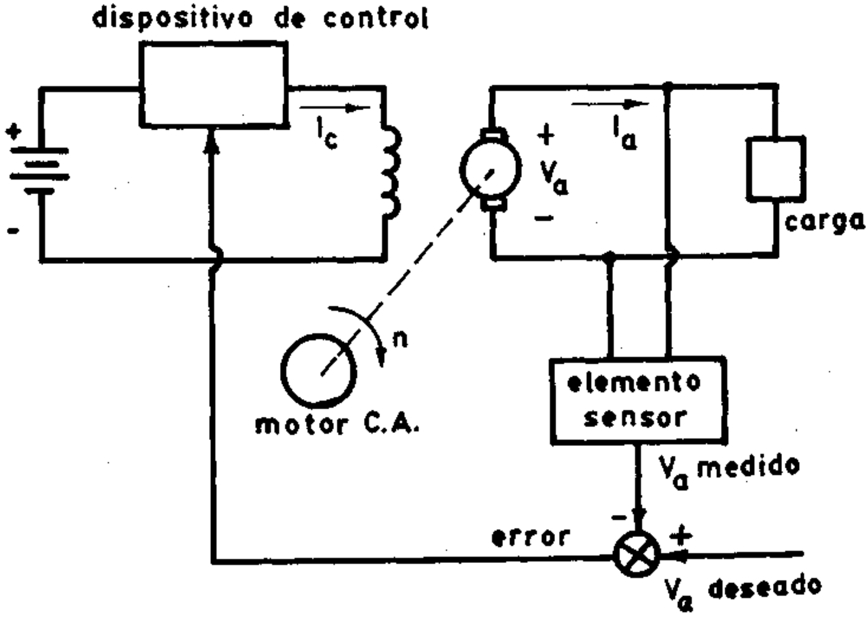
Por otra parte, la moderna Ingeniería Eléctrica está orientada en este sentido, no hay más que ver los trabajos publicados a nivel internacional en prestigiosas publicaciones, para poder apreciar la exactitud de esta aseveración. [12], [13], [14], [15], [16], [17].

Como dijimos en la introducción, creemos que la adquisición de conocimientos fundamentales de la teoría de C.A, sumado al conocimiento de la tecnología de los semiconductores de potencia, permitirán al ingeniero eléctrico, sin necesidad de que tenga que entrar a la etapa del diseño o del análisis de los sistemas de control, evaluar de una manera más justa, la importancia y conveniencia de su aplicación.



+
I_c
-
+
V_a
-
carga
n
motor C.A.
(a)
V_a (V)
I_a (A)
I_a nom.
(b)

FIG. 1



dispositivo de control
+
-
I_c
+
V_a
-
I_a
carga
n
motor C.A.
elemento sensor
V_a medido
-
+
error
V_a deseado

FIG. 2

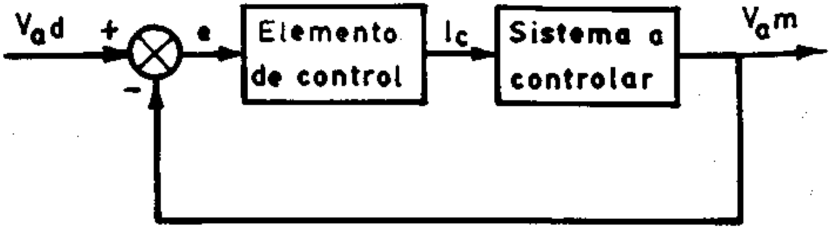


FIG. 3

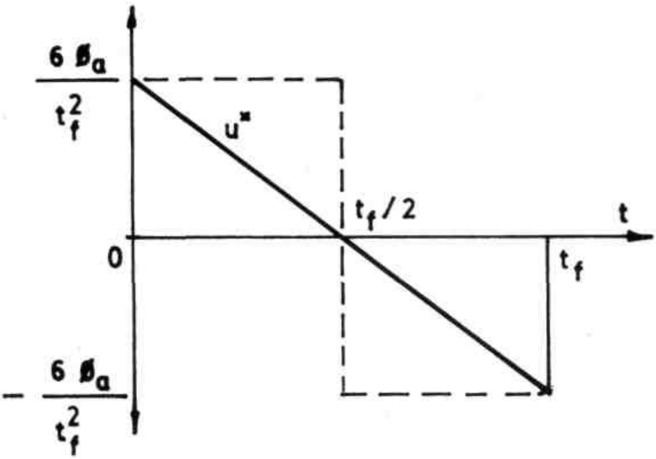


FIG. 4

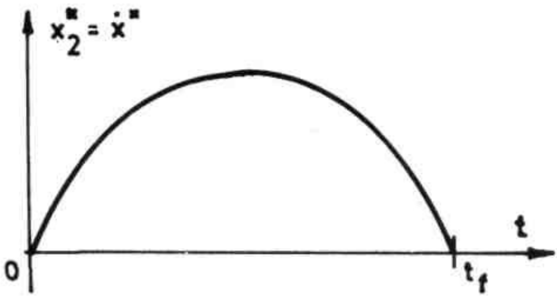


FIG. 5

AGRADECIMIENTO:

El autor agradece al Profesor Ingeniero Heriberto Storoni, las valiosas sugerencias y discusiones sobre el tema.

* * *

4. - REFERENCIAS

1— K. Ogata: INGENIERÍA DE CONTROL MODERNA, Prentice-Hall, Inc.

2— Olle Elgerd: CONTROL SYSTEMS THEORY, McGraw-Hill, 1967.

3— Benjamin Kuo: SISTEMAS DE CONTROL REALIMENTADO, CECSA 2ª Edición.

4— Olle Elgerd: ELECTRIC ENERGY SYSTEMS THEORY, McGraw-Hill, 1971.

5— A. Netushil: THEORY OF AUTOMATIC CONTROL, Edit. Mir, 1973.

6— Donald Kirk: OPTIMAL CONTROL THEORY, Prentice-Hall, 1970.

7— Andrew P. Sage: OPTIMUM SYSTEMS CONTROL, Prentice-Hall 1968.

8— K. J. Aström and P. Eykhoff: SYSTEM IDENTIFICATION - A. SURVEY, Automática, vol. 7, Pergamon Press, 1971.

9— E. Handschin: REAL-TIME DATA PROCESSING USING STATE ESTIMATION IN ELECTRIC POWER SYSTEMS, Proceeding of the Symposium on Real-Time Control of Electric Power Systems - Switzerland, 1971.

10— J. G. Siroux, J. Pouget and Merlin: THE ECONOMIC LOAD DISPATCHSTATE OF THE PROBLEM AND DEVELOPMENTS AT ELECTRICI-TE DE FRANCE, Proceeding of the Symposium on Real-Time Control of Electric Power Systems, Switzerland, 1971.

11— C. W. Ross: ADAPTIVE TECHNIQUES APPLIED TO CONTROL OF INTERCONNECTED POWER SPSTEMS, Proceeding of the First Annual Advanced Control Conference, Purdue University, Lafayette, Indiana, 1974.

12— A. Muñoz, G. Pesse, A. Sabat e I. Davis: CONTROL OPTIMO REALIMENTADO DE UNA MAQUINA SINCRÓNICA DOBLEMENTE EXCITADA, Publicación Departamento Electricidad, Grupo de Máquinas, Universidad de Chile 1972.

13— G. Toacse and W. Culpi: TIME-OPTIMAL CONTROL OF A STEPPER MOTOR, IEEE Trans, on Industrial Electronics and Control Instrumentation, vol. IECI - 23, Nº 3, 1976.

14— T. Maloney and P. Alvarado: A DIGITAL METHOD FOR DC MOTOR SPEED CONTROL, IEEE Trans, on Ind. Electr. and Control Instr., vol. 24 Nº 1, 1977.

15— J. R. Woodbury: EFFICIENT CONTROL OF A-C MACHINES IN THE BRUSHLESS D-C CONFIGURATION, IEEE trans, on Ind. Electr. and Control Instr., vol. 24, Nº 1, 1977.

16— R. T. Irish: A NOVEL USE OF THE SCR TO RUN MULTIPHASE INDUCTION MOTORS FROM A SINGLE-PHASE SUPPLY, IEEE Trans. ond Ind. Electr. and Control Instr., vol. 21, Nº 3, 1974.

17— A. Kusko, T. Knutrod: HIGH FRECUENCY SCR CHOPPER CIRCUIET IMPROVES DC SERVO MOTOR RESPONSE, Control Engineering, March 1974.