

## **Práctica – Motor de Corriente Continua**

**A Imán Permanente**

**B Excitación Independiente**

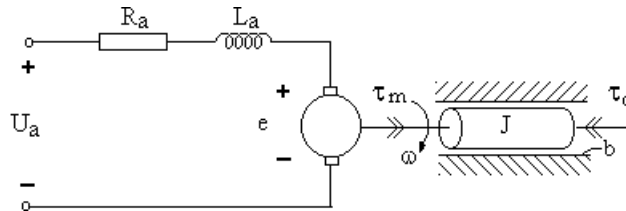
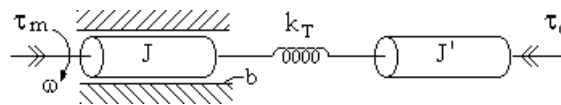
**C Excitación en Derivación**

**D Excitación Serie**

**E WardLeonard**

**Práctica – Motor de Corriente Continua****Código: P1-MCC.CurMot****A Imán Permanente****1 Diagrama de Bloques.**

- a) Dibuje el *Diagrama de Bloques* (DB) del Motor de Corriente Continua de Imán Permanente (MCC-IP). Considere el modelo idealizado de la Fig. 1.
- b) Replantee el DB despreciando la inductancia de armadura. Haga cada DB con el detalle de todas las relaciones constitutivas y estructurales del modelo.
- c) En ambos casos anteriores compacte todos los subsistemas que pueda y representelos con bloques normalizados ( $P_{T1}$ , etc.) adecuadamente parametrizados (p. ej., especifique  $K$  y  $T_1$  en el caso de un  $P_{T1}$ ).
- d) Repita los puntos a) y c) anteriores para el modelo de la Fig. 1 modificado con un volante de inercia  $J'$  acoplado al momento de inercia  $J$  a través de un resorte lineal de constante de torsión  $k_T$ . Un par de carga externo ataca en el volante  $J'$  (ver Fig. 2).

**Figura 1.** MCC Imán Permanente.**Figura 2.** Carga acoplada elásticamente.**2 Funciones Transferencias.**

- a) Leyendo el DB del punto 1a) escriba la función transferencia (FT)  $G_c(s)$  <sup>(1)</sup>:  $U_a(s) \rightarrow \Omega(s)$

$$G_c(s) = \frac{\Omega(s)}{U_a(s)}$$

Verifique que es un  $P_{T2}$ , como en [1, p. 16].

- b) Sabiendo que los polos de un  $P_{T2}$  se pueden expresar como  $p_{1,2} = -\xi\omega_n \pm j\omega_n\sqrt{1-\xi^2}$ . Escribir  $\xi$  y  $\omega_n$  en función de los **parámetros físicos**. Analice la incidencia de estos últimos sobre los polos.

- c) Escriba la  $G_c(s)$  en función de los parámetros sistémicos  $T_a = \frac{L_a}{R_a}$ ,  $T_r = \frac{J}{b}$ ,  $T_m = \frac{J}{b + K_m^2 / R_a}$

1 \_\_\_\_\_

Con el subíndice “c” queremos denotar que se trata de la transferencia asociada a la variable de control. El subíndice “p” en la FT del par indica que se trata de la perturbación.

- d) Para al menos dos motores de las hojas de datos [3], calcule numéricamente los polos de la FT  $G_c(s)$  y compárelos con los polos  $1/T_a$ ,  $1/T_r$  y  $1/T_m$ .
- e) Escriba la FT normalizada  $G_p(s): \tau_c(s) \rightarrow \Omega(s)$ , y su correspondiente mnemónico. Observe que  $G_c(s)$  y  $G_p(s)$  tienen el mismo denominador. ¿Por qué? Indique el grado relativo de ambas FTs. Calcule simbólicamente el cero de esta FT en función de los parámetros físicos, y numéricamente para los motores que eligió anteriormente.
- f) Escriba las FTs normalizadas siguientes y analícelas tal como hizo con las anteriores. Luego trate nuevamente el problema para el modelo que supone  $L_a = 0$ .

$$G_{IC}(s) = \frac{I_a(s)}{U_a(s)}$$

$$G_{IP}(s) = \frac{I_a(s)}{\tau_c(s)}$$

- g) Para ambos motores elegidos dibuje cualitativamente la respuesta temporal  $\omega(t)$  a un escalón unitario en las entradas  $U_a(s)$  y  $\tau_c(s)$  y especifique sus valores inicial, final, máximo/mínimo, tiempos de sobrevalor, pulsación, etc. Explote al máximo los índices estructurales orden y grado relativo, y las propiedades de las respuestas de ellos derivados.
- h) Idem anterior para la respuesta temporal  $I_a(t)$  a los mismos escalones anteriores.

### 3 Frenado Dinámico.

Analice el artículo indicado en la referencia [5]. Use al máximo las herramientas de análisis de Control I / DSF.

### 4 Ecuaciones de Estado y de Salida.

Escriba las *Ecuaciones de Estado* (EE) y las *Ecuaciones de Salida* (ES). Modelo Fig. 1.

- a) Tome como salidas las siguientes variables:  $y_1$ : *velocidad en el eje*;  $y_2$ : *aceleración angular*.
- b) Considere ahora la salida  $y_3$ : *posición angular del rotor*.

En ambos casos escriba las ecuaciones en forma matricial. Halle los autovalores de las matrices de evolución del sistema.

- c) Repita los puntos anteriores para el modelo usado en el punto 1-d).
- d) Calcule los estados de régimen (alimentación y carga constantes) para los modelos 3a) y 3b) y compárelos.

## B Excitación Independiente

*Obs.:* tanto en este como en todos los ejercicios siguientes trate de aprovechar al máximo los resultados que obtuvo al tratar el MCC\_IP.

### 1 Diagrama de Bloques.

- a) Dibuje el DB del *Motor de Corriente Continua de Excitación Independiente* (MCC-EI). Replantee el DB despreciando la inductancia de armadura. Considere el modelo idealizado de la Fig. 3.

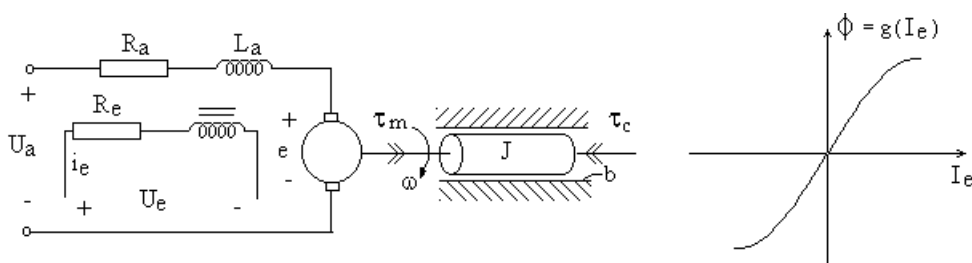
## 2 Ecuaciones de Estado y de Salida.

Escriba las EE y las ES.

- a) Tome como salidas las siguientes variables:  $y_1$ : *velocidad en el eje*;  $y_2$ : *aceleración angular*;  $y_3$ : *"jerk" o derivada temporal de la aceleración angular*.

## 3 Funciones Transferencias

- a) Obtenga un modelo incremental linealizado (MILin) del MCC-EI en torno a un punto de operación (PO o RPE) genérico. En relación con el modelo MCC-EI anterior, observe que puede obtener el MILin formalmente por el simple reemplazo de  $K_N$  (en el caso anterior igual a  $K_m \Psi_N$ ) por  $K_{op} = K_m \Psi_{op}$ , donde  $\Psi_{op}$  es el valor del flujo en el PO. Naturalmente, este MILin vincula las variaciones  $\Delta x$  de las variables en torno al PO.
- b) Obtenga la FT normalizada entre las variaciones de la tensión de alimentación de la excitación y de la velocidad del rotor (mantenga separado el polo del circuito de excitación!). Observe que es un PD<sub>T3</sub> no-mínima fase. Explique la razón física de este carácter de fase no-mínima.



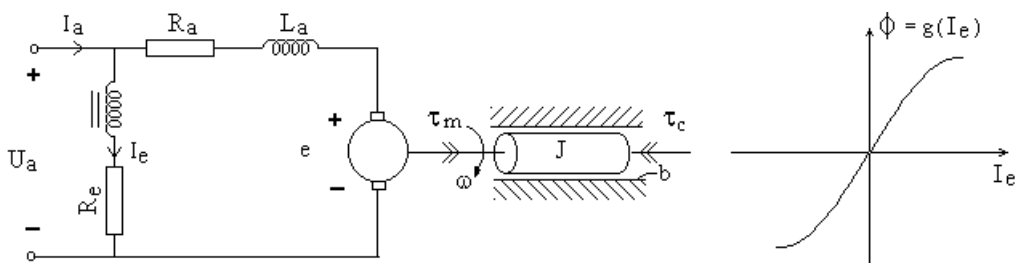
**Figura 3.** MCC Excitación Independiente

- c) Escriba los parámetros matemáticos de los modelos de esta FT ( $K$ ,  $\xi$ ,  $\omega_n$ ,  $T_D$ ,  $T_L$ , ver [2]) en función de los parámetros físicos de la máquina ( $K_N$ ,  $R_a$ ,  $L_a$ ,  $J$ ,  $b$ ). Hay una sobreparametrización física?
- d) Escriba la expresión de los polos y del cero de la FT en términos de los parámetros físicos.

## C Excitación en Derivación

### 1 Diagrama de Bloques.

- a) Dibuje el DB del Motor de Corriente Continua de Excitación en Derivación (MCC-De). Replantee el DB despreciando la inductancia de armadura.

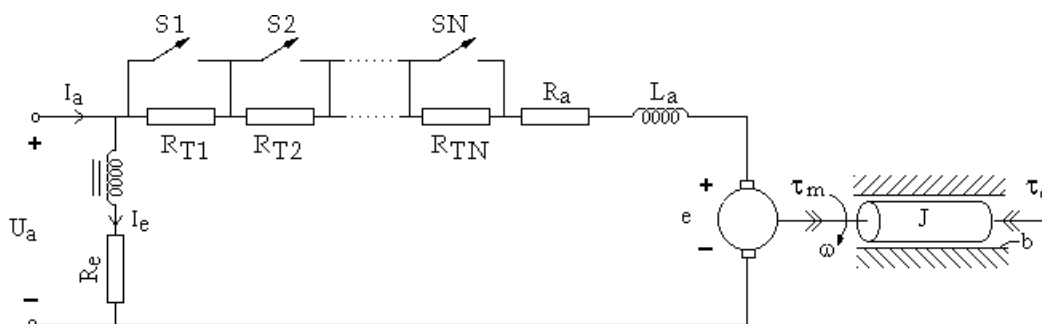


**Figura 4.** MCC Excitación en Derivación.

## 2 Arranque automático con resistencias limitadoras. Frenado dinámico.

a) Una forma práctica clásica de limitar el pico de la corriente de armadura en el arranque es conectar un grupo de resistencias en serie con la armadura, con un dispositivo de control que en función de la corriente de armadura sensada actúa cortocircuitando las resistencias a través de las llaves S1, S2...y SN. Inicialmente todas las llaves están abiertas y todas las resistencias conectadas en serie de manera que la corriente máxima de armadura iguale a un valor máximo  $I_{aMAX}$ . Luego, el incremento de la velocidad y con ella de la  $\omega$ , hace decaer la corriente  $I_a$  hasta alcanzar un valor inferior mínimo ( $I_{aMIN}$  definido en el dispositivo de control). En este instante el control cierra la primera llave (S1) cortocircuitando la  $R_{T1}$ , lo que genera un nuevo pico de corriente que deberá estar acotado por  $I_{aMAX}$ . De aquí en adelante se repite este proceso hasta finalmente desconectarse todas las resistencias de arranque.

Calcule el valor de las resistencias de arranque, a partir de los datos del Motor en Derivación C de la Hoja de Datos de Motores y considerando que la corriente máxima admisible será dos veces la corriente nominal  $I_{aMAX} = 2 \cdot I_{aNOM}$ , mientras que el valor del límite inferior de corriente del dispositivo será la corriente nominal  $I_{aMIN} = I_{aNOM}$ , [4, p. 89].



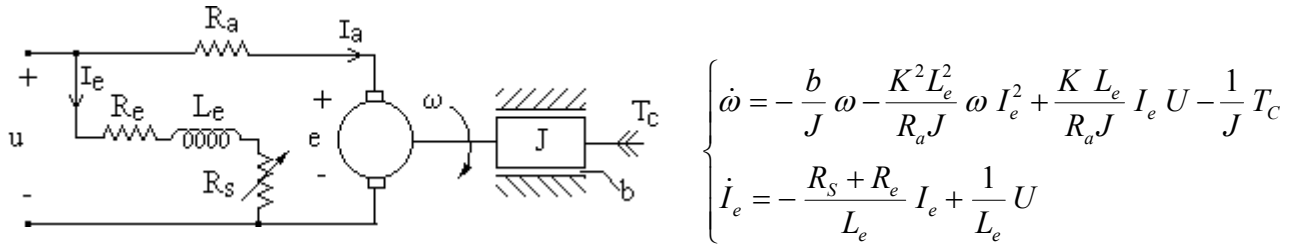
**Figura 5.** MCC Excitación en Derivación con resistencias de arranque en serie con la armadura

- b) Suponga que falla el sensado de la corriente que comanda la desconexión de las resistencias de arranque. ¿Qué ocurre? Calcule la velocidad final del motor. [4, p. 131]
- c) Considere ahora que el motor está funcionando en régimen sin carga alimentado con  $U_{aN}$ . En un instante determinado se desconecta de la fuente de alimentación e inmediatamente se le conecta una resistencia  $R_{fd}$  en sus terminales (este método es conocido como **frenado dinámico**). Obtenga el DB a partir de dicho instante. [4,p. 131].
- d) Simule las 3 situaciones anteriores para el MCC-De usado.

## 3 PO. Operación en RPE.

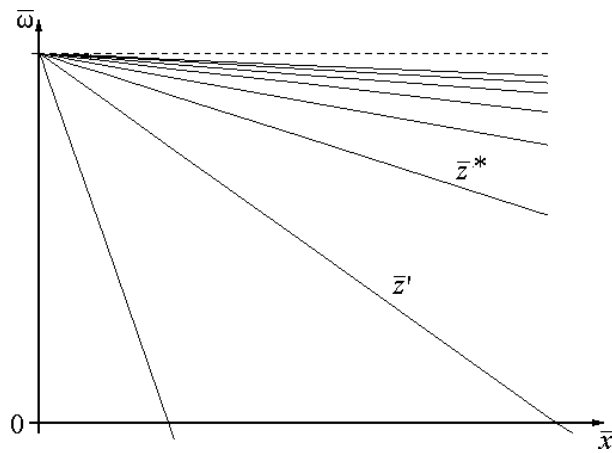
El problema que sigue es una guía (parcial) para el análisis sobre el modelo P.O. de este MCC de las posibilidades de su operación en RPE.

Sean el circuito equivalente y las EE del MCC-De. El motor se controla con la tensión  $U$  y con la resistencia  $R_s$  para debilitar el campo de excitación.



**Figura 6.** MCC Excitación en Derivación con  $R_s$ .

- Calcular el P.O. genérico para  $U = \bar{U}$  y  $T_c = \bar{T}_c$  constantes.
- Particularizar el P.O. para  $b = 0$  (simplificará el análisis).
- La gráfica muestra la dependencia estática de la velocidad respecto de las entradas:  $\bar{\omega} = g(\bar{U}, \bar{T}_c)$ , sin indicar cual de las variables es  $\bar{U}$  y cual es  $\bar{T}_c$ .



**Figura 7.** Gráfica Estática de la velocidad en función de las entradas.

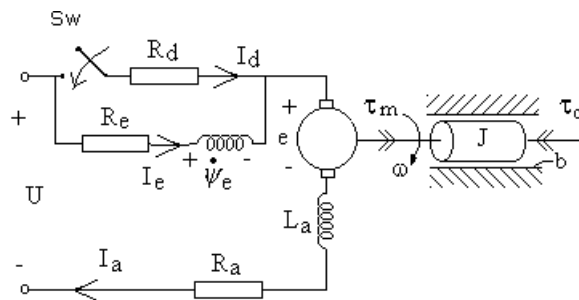
- Establecer la correspondencia entre los pares de variables  $(\bar{x}, \bar{z})$  y  $(\bar{U}, \bar{T}_c)$  (¿cuál es cuál?).
- Determinar el valor del punto de intersección de las semirrectas sobre el eje  $\bar{\omega}$ .
- Determinar, en función de los parámetros físicos, el valor de un punto de intersección genérico de las rectas con el eje  $\bar{x}$ .
- Determinar los valores de la entrada  $\bar{z}$  correspondientes a las semirrectas límite (horizontal y vertical).
- Las semirrectas se han dibujado para valores equiespaciados de la entrada  $\bar{z}$ . Explique la distribución no homogénea de las semirrectas. Indique sobre la gráfica el sentido positivo de  $\bar{z}$ .
- ¿Qué significa físicamente la semirrecta horizontal, desde el punto de vista de la operación en RPE del motor?
- Elegir e indicar completa y claramente sobre la gráfica el punto de operación nominal  $(\omega_N, T_{cN}, U_N)$ . Hacer una elección arbitraria que tenga sentido físico.
- Respetando la elección anterior, indicar el punto correspondiente a rotor bloqueado (RB) y cupla de carga nominal (o sea, identificar  $\bar{U} = U_{RB, T_{cN}}$ ).
- En función de lo enunciado y lo anteriormente resuelto, explique:

- cómo se opera el motor entre  $\bar{\omega} = 0$  y  $\bar{\omega} = \omega_N$ ,
- cómo se lo lleva por encima de la velocidad nominal  $\bar{\omega} > \omega_N$ ,
- cómo se manifiesta todo lo precedente sobre las gráficas.
- En particular considere si estas gráficas se pueden mover y cómo se haría esto. ¿Cómo aplica esto a la recta horizontal?

## D Excitación Serie

### 1 Diagrama de Bloques.

- Dibujar el DB del *Motor de Corriente Continua de Excitación Serie* (MCC-Se) en sus dos posibles conexiones: a campo pleno (llave abierta) y con debilitamiento de campo (llave cerrada). Tome como salidas la velocidad del motor, los flujos de armadura  $\psi_a$  y de excitación  $\psi_e$  y el "jerk" (derivada temporal de la aceleración angular).



**Figura 8.** MCC Excitación Serie.

- Agrupe los bloques de los subsistemas eléctrico(s) y mecánico en sendos sistemas de primer orden. Indique orden y grado relativo de cada uno de los modelos.

### 2 Ecuaciones de Estado.

- Escriba las Ecuaciones de Estado para el modelo con y sin debilitamiento de campo.

### 3 Característica Mecánica de Salida.

- Hallar la expresión de la característica estática de salida ( $\tau_{em}$ ,  $\omega$ ). Grafíquela usando los datos del *motor* E de [3] (use, por ej., MatLab).

## E Ward Leonard

En muchas industrias aún se pueden encontrar Grupos Ward Leonard (GWL) instalados y en servicio. En un GWL tradicional, el amplificador de potencia controlado que alimenta al MCC es un Generador de Corriente Continua (GCC) controlado por el campo y alimentado mecánicamente por una Máquina Primaria (MP) de potencia suficiente para mantener la velocidad aproximadamente constante. De esta manera la señal de (relativamente) baja potencia  $U_{control}$  controla la tensión de armadura del GCC a través de su campo de excitación, modulando así la transferencia de potencia de la MP al MCC. En el esquema básico de la figura 9 se muestra un GWL en un esquema de control de velocidad en lazo cerrado.

**Sugerencia:** Establezca la analogía entre componentes y variables con el caso de alimentar a la máquina con un convertidor estático.

## 1 Diagrama Mixto. Diagrama de Bloques.

- Realice el Diagrama Mixto (DM) del sistema físico idealizado del GWL, (Ver Fig.9).
- Causalícelo considerando que la máquina primaria entrega cupla.
- Vuelva a causalizar el DM ahora con la hipótesis de que la velocidad de la MP es constante.
- DM  $\rightarrow$  DB del GWL, según la causalidad pedida en el punto c). Con la hipótesis de que la MP tiene su velocidad constante es fácil entender como realizar el control redibujando el DB anterior pensando a  $\omega_{MP}$  como una ganancia.

## 2 Función Transferencia.

- Escriba la función transferencia  $G_c(s) = \Omega(s) / U_{control}(s)$  del DB considerando  $\omega_{MP}$  como una ganancia. Indicar el orden y el grado relativo de la FT.

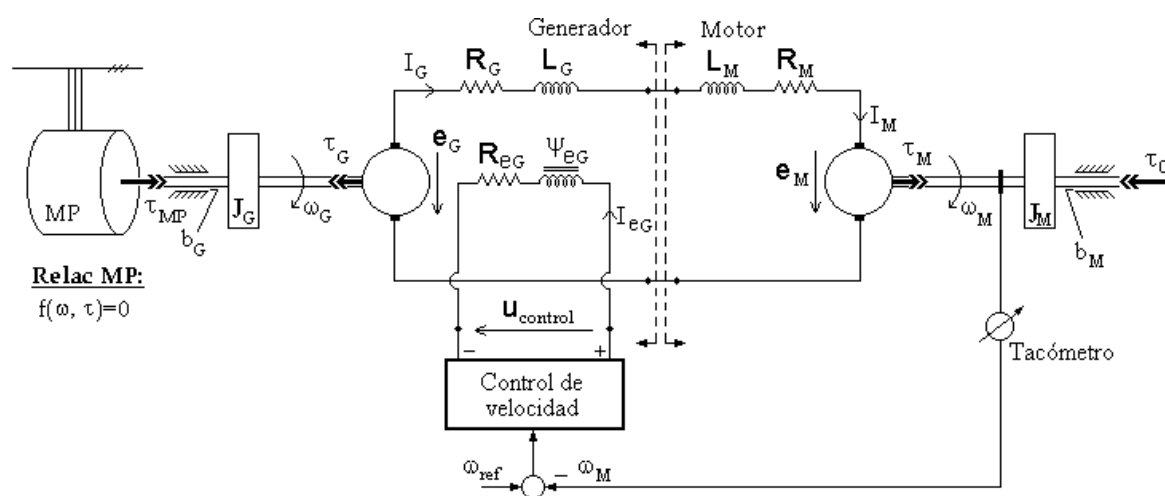


Figura 9. Esquema Ward Leonard

## 3 Control de velocidad. Simulación.

- Proponga una estrategia de control adecuada para hacer una regulación de la velocidad del motor.
- Realice la simulación de un GWL con los datos de la tabla 1 [4,p. 119]. Simule el sistema a lazo abierto.
- Cierre el lazo con el control propuesto en el punto 3a) y verifique su correcto funcionamiento.
- Investigue el desempeño del control provocando una reducción del 50% en el torque de carga (2375 N·m) y luego ante variaciones en la referencia de velocidad.

Tabla 1. Datos de un GWL.

GENERADOR	200 kW	250 V	600 r/min
	$R_a=0.01 \Omega$	$R_G=12.5 \Omega$	$K_e=0.02 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{Wb}\cdot\text{A}$
	$L_a=0.0003 \text{ H}$	$L_G=10 \text{ H}$	
MOTOR	150 kW	250 V	600 r/min
	$R_a=0.012 \Omega$	$K_N=3,75 \text{ V}\cdot\text{s}$	$J=30 \text{ Kg}\cdot\text{m}^2$
	$L_a=0.00035 \text{ H}$		



## Referencias

- 1 Junco, S., *Transparencias de Clases de Motor de Corriente Continua* para el curso “Dinámica y Control de Motores Eléctricos”, Cátedra Dinámica de los Sistemas Físicos, DE, FCEIyA-UNR.
- 2 TDBN, 1985, “Tabla de Diagramas de Bloques Normalizados” (Código T01C05.88), Cátedra Dinámica de los Sistemas, Departamento de Electrónica, FCEIyA-UNR.
- 3 Hojas de Datos de MCCs, Especificaciones de máquinas de continua para el curso “Dinámica y Control de Motores Eléctricos”, Cátedra Dinámica de los Sistemas Físicos, DE, FCEIyA-UNR.
- 4 Krause, P. C., Oleg Wasynczuk, and Scott Sudhoff, *Analysis of Electric Machinery*, IEEE, Inc., New York, 1995.
- 5 Erdman, William. *Dynamic Braking of DC Machines: A Mathematical Approach*. IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 1A-19, pp. 388-392, May./Jun. 1983.