

## CAPÍTULO 4

# CARACTERÍSTICAS DE CONTROL DE LOS ACCIONAMIENTOS DE MOTORES DE RELUCTANCIA CONMUTADA

### 4.1 INTRODUCCIÓN

El control de los accionamientos con motores de reluctancia conmutada es completamente diferente del de los accionamientos convencionales sea de corriente continua o alterna. Es por ello que se hace necesario introducir nuevos conceptos referidos a las variables de control, la relación entre las mismas, y las estrategias de control. A pesar de ello no se ha publicado mucho sobre el análisis de las características de control del SRM. Fundamentalmente los artículos se han limitado a los aspectos de control relativos al diseño del motor [47][56][68]; al análisis simplificado [30][34][44][69][70][71][72][73], o parcial [74][75][76] del accionamiento; y a la descripción de sistemas de control [9][77][78][79][80][81][82].

En este capítulo de la Tesis se lleva a cabo un análisis exhaustivo de las características de control, identificando las variables de control y sus rangos de variación. Se calcula la relación entre el par medio desarrollado por el motor y las variables de control, hallando la máxima cupla alcanzable en cada punto de operación. Finalmente se formulan algunos esquemas básicos para el control de velocidad.

El análisis se desarrolla en dos etapas, empleando el modelo presentado en el capítulo anterior para representar las características magnéticas del motor. En la primera se realiza un análisis simplificado limitado a la operación en la zona lineal, es decir que la corriente en cada fase queda limitada a su valor de saturación  $I_m$  [83]. Este tipo de análisis, a pesar de no ser real, ya que el SRM trabaja con buena saturación magnética,

proporciona resultados significativos sobre la controlabilidad del motor. De hecho varios autores han tomado un modelo lineal de las características magnéticas para el proyecto inicial de un sistema de control [69][71][73][82][84][85]. En la segunda etapa se analiza la parte central de las características magnéticas, o sea la zona de saturación [86].

El análisis de las características de control del SRM se lleva a cabo en estado estacionario, suponiendo una velocidad de giro constante. Las características de la cupla desarrollada por el motor son determinadas con relación al par medio desarrollado, el cual como se explicó en el capítulo anterior, puede ser expresado como el par medio de una sola fase multiplicado por el número de fases,

$$T_{av} = \frac{q}{\alpha_r} \int_{-\theta_1}^{\alpha_r - \theta_1} \tau \, d\theta \quad (4.1)$$

donde  $\tau$  es la cupla instantánea de una fase cualquiera.

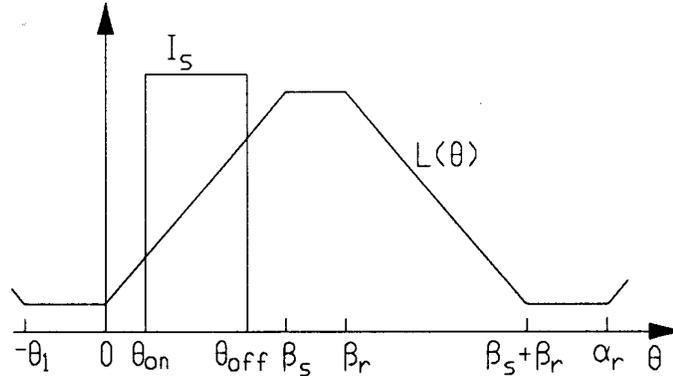
Para el cálculo de la cupla instantánea, se considera al SRM alimentado bien con una fuente de corriente o una fuente de tensión. Con la primera, un generador de corriente de amplitud variable fuerza pulsos de corriente en las fases en ciertas posiciones rotóricas. Asumiendo que el generador es ideal, los pulsos de corriente pueden suponerse cuadrados a fin de simplificar el análisis y obtener una primera aproximación de las características de control. Con la segunda fuente de alimentación, un generador de tensión de amplitud igual al valor nominal, se aplica a las fases del motor en determinadas posiciones rotóricas. Es posible conmutar el generador entre polaridad positiva y negativa a fin de controlar la corriente que circula por las fases. Una tensión positiva permite establecer una corriente en las fases, mientras que una tensión negativa provoca una rápida extinción de la misma.

El análisis realizado se verifica en forma numérica para un SRM cuyos datos y parámetros son:

$$P_N=7.5\text{KW}, \Omega_N=1900\text{rpm}, V_N=460\text{V}, I_N=32\text{A}, I_m=8\text{A}, q=4, N_s=8, N_r=6, \\ \beta_s=20^\circ, \beta_r=24^\circ, \alpha_r=60^\circ, L_u=10\text{mH}, L_a=110\text{mH}, \Gamma=11, \sigma=.3, R=1\Omega,$$

## 4.2 OPERACIÓN EN LA ZONA LINEAL

### 4.2.1 Alimentación con fuente de corriente



**Figura 4.1** Diagrama de corriente típico de un accionamiento con alimentación de corriente

En la Figura 4.1 se presenta un diagrama típico de corriente para el SRM operando como motor, cuando es alimentado con una fuente de corriente. En ella se incluye el perfil de inductancia como referencia de la posición rotórica. Se observa que la corriente es forzada en la fase en  $\theta_{on}$  y es removida en  $\theta_{off}$ , encontrándose ambos ángulos en la zona de inductancia creciente. Se define a la distancia angular entre ambos como el intervalo de conducción de la fase.

Las variables de control de un accionamiento con alimentación de corriente son: la amplitud del generador de corriente ( $I_s$ ), y los ángulos de encendido y apagado ( $\theta_{on}$  y  $\theta_{off}$ ). La corriente es controlada entre 0 e  $I_m$ , y los ángulos entre 0 y  $\beta_s$ , con  $\theta_{on} < \theta_{off}$ . El intervalo de conducción no debe superar al paso del motor, para evitar la conducción simultánea de dos fases, hecho que dividiría la corriente del generador entre ambas. Así resulta

$$(\theta_{off} - \theta_{on})_{max} = \frac{\alpha_r}{q} = e \quad (4.2)$$

Ignorando los picos de tensión debidos a los flancos abruptos de corriente, la tensión en la fase iguala a la fuerza contraelectromotriz ( $f_{cem}$ ) durante el intervalo de

conducción

$$v = K I_s \Omega \quad \theta_{on} < \theta < \theta_{off} \quad (4.3)$$

y es igual a 0 en el resto del ciclo. De manera análoga la cupla instantánea es

$$\tau = \frac{1}{2} K I_s^2 \quad \theta_{on} < \theta < \theta_{off} \quad (4.4)$$

y es nula en el resto del ciclo. Introduciendo (4.4) en (4.1), el par medio resulta

$$T_{av} = \frac{q K}{2 \alpha_r} I_s^2 (\theta_{off} - \theta_{on}) \quad (4.5)$$

La ecuación (4.5) muestra que son dos las variables de control efectivas: a) la amplitud de la corriente, de la cual la cupla depende en forma cuadrática; y b) el intervalo de conducción, con el cual la cupla media tiene una dependencia lineal.

El máximo par obtenible con este accionamiento, se logra cuando el intervalo de conducción iguala la (4.2) y la corriente su valor de saturación ( $I_m$ ). Esta cupla puede ser desarrollada hasta que la tensión sobre la fase iguala su valor nominal  $V_N$ , es decir hasta una velocidad que se obtiene de (4.3) y que se define como la velocidad nominal del motor.

$$\Omega_N = \frac{V_N}{K I_m} \quad (4.6)$$

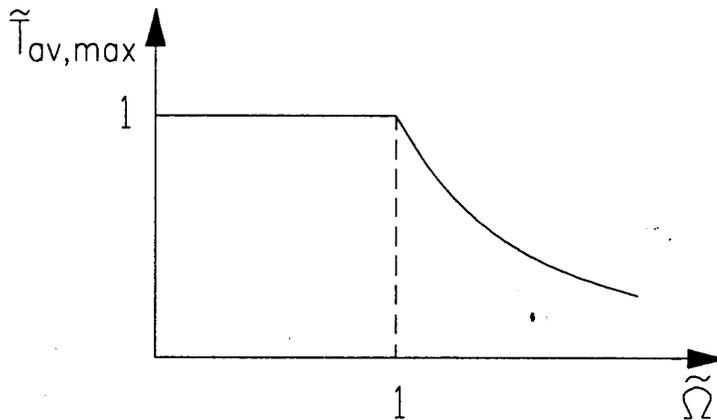
por encima de esta velocidad, la máxima corriente debe ser disminuida para evitar que la tensión supere su valor nominal. El límite de corriente resulta

$$I_{S,\max} = \begin{cases} I_m & \Omega \leq \Omega_N & (a) \\ I_m \frac{\Omega_N}{\Omega} & \Omega > \Omega_N & (b) \end{cases} \quad (4.7)$$

Este límite de corriente impone el máximo par que puede desarrollar el motor, determinando la capacidad de producción de cupla que resulta igual a

$$T_{av,\max} = \begin{cases} \frac{1}{2} K I_m^2 & \Omega \leq \Omega_N & (a) \\ \frac{1}{2} K I_m^2 \left( \frac{\Omega_N}{\Omega} \right)^2 & \Omega > \Omega_N & (b) \end{cases} \quad (4.8)$$

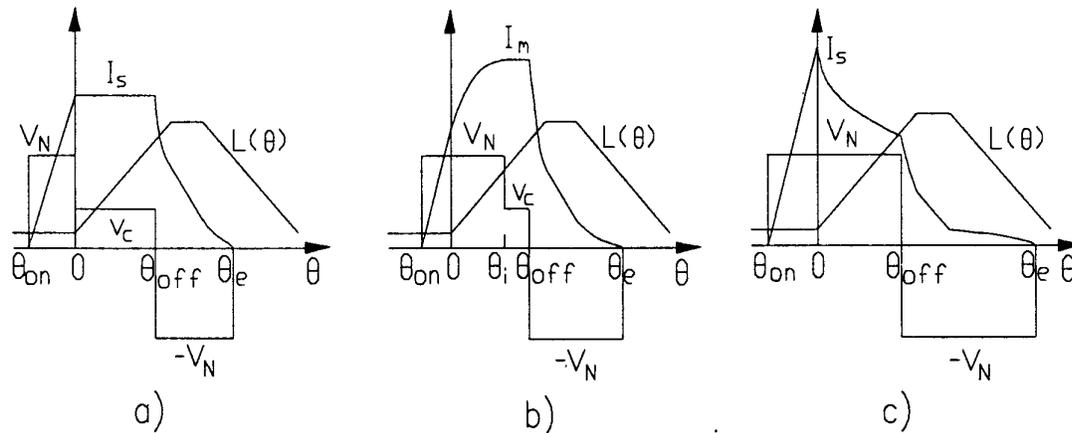
En la Figura 4.2 se presenta, en forma normalizada, la cupla máxima en función de la velocidad definida por (4.8). Los valores base de la normalización son los definidos en la lista de símbolos.



**Figura 4.2** Características cupla-velocidad para un accionamiento con fuente de corriente

## 4.2.2 Alimentación con fuente de tensión

### 4.2.2.1 Descripción del funcionamiento



**Figura 4.3** Diagramas típicos de tensión y corriente para un accionamiento con fuente de tensión

En un accionamiento alimentado con fuente de tensión, pueden encontrarse distintas formas de onda para la tensión y la corriente. Diagramas típicos de operación motora se presentan en la Figura 4.3 a) b) y c). El análisis de los diagramas indica que el ciclo de trabajo incluye dos intervalos caracterizados por el signo de la tensión aplicada: a) intervalo de energización cuando la tensión es positiva, y b) intervalo de desenergización, cuando la tensión es negativa.

El intervalo de energización se extiende desde  $\theta_{on}$  hasta  $\theta_{off}$ . Al inicio la fuente de tensión se aplica a pleno sobre la fase, para establecer una corriente en ella. Desde 0 hasta  $\theta_{off}$ , pueden distinguirse dos modos de operación, según la fuerza contraelectromotriz sea menor (modo A) o mayor (modo B) que la tensión del generador. Siendo la  $f_{cem}$  igual a  $K_i\Omega$ , y la tensión nominal del motor igual a  $K_l I_m \Omega_N$ , de ambas expresiones resulta que el modo A tiene lugar mientras  $i\Omega < I_m \Omega_N$ . En este modo de operación la corriente tiende a crecer hasta un valor máximo igual a  $V_N/K\Omega$ , y es regulada en la amplitud deseada conmutando el generador de tensión de modo de obtener una tensión media igual a la  $f_{cem}$  ( $v_c$ ) [Figura 4.3 a) y b)]. El modo B tiene

lugar cuando la  $f_{cem}$  es mayor que la tensión del generador, es decir,  $i\Omega > I_m \Omega_N$ . En este modo de operación el generador queda aplicado completamente sobre la fase en todo el intervalo de energización, y la corriente a partir de 0 decrece tendiendo al valor dado por (4.7) b) [Figura 4.3 c)]. La condición  $i\Omega = I_m \Omega_N$ , separa ambos modos de operación. Para velocidades menores que la nominal, esta condición se verifica para valores de corriente superiores al valor de saturación, por lo tanto solo es posible operar en el modo A. Por encima de la velocidad nominal ambos modos pueden ocurrir dependiendo de la amplitud de la corriente en  $\theta=0$ : cuando este valor es menor que (4.7) b) el motor trabaja en el modo A, mientras el modo B tiene lugar en caso contrario.

El intervalo de desenergización se extiende desde  $\theta_{off}$  cuando la tensión del generador es aplicada sobre la fase con signo negativo para extinguir la corriente, hasta  $\theta_e$  cuando la corriente efectivamente se extingue. Si  $\theta_e$  se encuentra en la zona de inductancia decreciente, se desarrolla una cupla instantánea negativa.

Igual que en el caso de alimentación con fuente de corriente, las variables de control continúan siendo la amplitud de la corriente, y los ángulos de encendido y apagado. La corriente se controla entre 0 e  $I_m$ . El ángulo de encendido puede ser tanto positivo como negativo, como para establecer una mayor o menor corriente. Su mínimo valor es  $-\theta_1$  para evitar el desarrollo de una cupla negativa en el establecimiento de la corriente, y el máximo es  $\beta_s$ . El ángulo de apagado es siempre mayor que el de encendido, y es controlado entre 0 y  $\beta_s$ , mientras  $\theta_e$  sea menor que  $\alpha_T + \theta_{on}$ . En caso contrario el máximo ángulo de apagado debe ser disminuido para satisfacer la condición  $\theta_e = \alpha_T + \theta_{on}$ . Esta condición asegura que la corriente se extinga antes que el generador vuelva a ser aplicado sobre la fase. Si esta condición no se cumpliera, la corriente crecería sin límite saturando completamente al motor.

Cuando una fase es alimentada con cualquiera de las tensiones mostradas en la Figura 4.3, la corriente puede expresarse en la siguiente forma general:

$$i = \begin{cases} \frac{V_N (\theta - \theta_{on})}{\Omega L(\theta)} & (\theta_{on} \leq \theta \leq \theta_i) \quad (a) \\ I_S = i(\theta_i) & (\theta_i < \theta \leq \theta_{off}) \quad (b) \\ \frac{1}{L(\theta)} \left[ i(\theta_{off}) L(\theta_{off}) - \frac{V_N (\theta - \theta_{off})}{\Omega} \right] & (\theta_{off} < \theta \leq \theta_e) \quad (c) \end{cases} \quad (4.9)$$

donde  $\theta_i=0$  en la Figura 4.3 a) y  $\theta_i=\theta_{off}$  en la Figura 4.3 c). La tensión media aplicada a la fase en el intervalo entre  $\theta_i$  y  $\theta_{off}$  es

$$v_c = K I_S \Omega \quad \theta_i < \theta < \theta_{off} \quad (4.10)$$

donde  $v_c$  es controlada entre 0 y  $V_N$ .

La cupla media puede escribirse como la suma de tres términos, siendo cada uno de ellos igual a:

$$T_1 = \frac{q K}{\alpha_r 2} \int_0^{\theta_{off}} i^2 d\theta \quad (a)$$

$$T_2 = \frac{q K}{\alpha_r 2} \int_{\theta_{off}}^{\beta_r} i^2 d\theta \quad (b) \quad (4.11)$$

$$T_3 = \frac{-q K}{\alpha_r 2} \int_{\beta_r}^{\theta_e} i^2 d\theta \quad (c)$$

donde  $i$  esta dada por (4.9).

#### 4.2.2.2 Relación entre la cupla producida y las variables de control

##### Modo A

Cuando el motor opera en modo A, pueden distinguirse dos submodos: a) submodo A-1 en el cual la amplitud de la corriente es regulada en el valor deseado desde 0 hasta el ángulo de apagado, como se muestra en la Figura 4.3 a); b) submodo A-2 en el cual la corriente no es regulada salvo que alcance su valor máximo, como se muestra en la Figura 4.3 b). De los tres términos que definen la cupla, solo  $T_1$  varía entre los dos submodos, por lo tanto se comienza el análisis con la influencia de los otros dos términos que son comunes.

Los términos  $T_2$  y  $T_3$  dependen del ángulo de apagado, la velocidad y el valor de la corriente en el instante de apagado. Las relaciones entre los términos de cupla y las variables de control se presentan en la Figura 4.4, donde  $T_2$  (línea llena) y  $T_3$  (línea de trazos) se muestran en forma relativa al valor de cupla en el instante de apagado

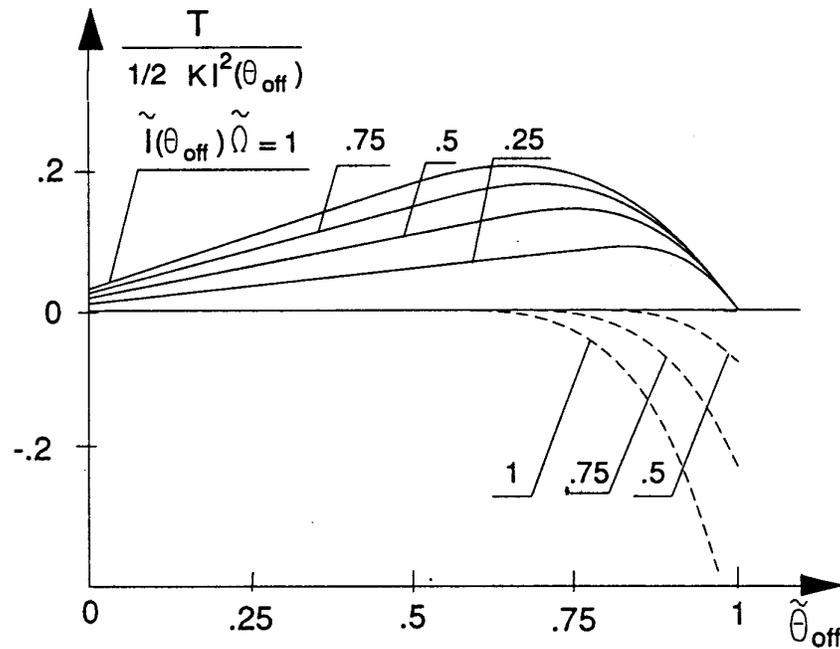


Figura 4.4 Términos de cupla  $T_2$  y  $T_3$  en modo A

$\frac{1}{2}Ki^2(\theta_{off})$ . Puede demostrarse, con la ayuda de (4.9) y (4.11), que el valor relativo de  $T_2$  y  $T_3$  presentado depende del producto  $i(\theta_{off})\Omega$  y no de sus valores individuales; es por ello que se ha tomado este producto como parámetro para las curvas.

La Figura 4.4 ilustra que las curvas de  $T_2$  presentan un máximo cuya posición disminuye para un incremento del parámetro; mientras el valor de  $T_3$  decrece monótonamente con el ángulo y con el parámetro. El módulo de ambas curvas crece con el aumento del producto de corriente y velocidad. Estas propiedades pueden entenderse mejor determinando el intervalo de extinción de la corriente ( $\theta_e - \theta_{off}$ ). Recordando que, si se desprecia la caída de tensión en la resistencia estática, la tensión aplicada a la fase es igual a la derivada del flujo concatenado por la misma, este intervalo resulta igual a

$$\theta_e - \theta_{off} = \frac{L(\theta_{off}) i(\theta_{off}) \Omega}{V_N} \quad (4.12)$$

donde el producto de la corriente y la inductancia en la posición  $\theta_{off}$  representa al flujo concatenado en el instante de apagado de la fase. La ecuación (4.12) muestra que debido al incremento de la inductancia con el ángulo de apagado, el intervalo de extinción también aumenta, y es el responsable del incremento de  $T_2$  en el rango inferior de  $\theta_{off}$ . Para un cierto valor de  $\theta_{off}$ , el ángulo de extinción supera a  $\beta_s$  con la consecuente disminución de  $T_2$ . Cuando  $\theta_e$  supera a  $\beta_r$  también aparece el término  $T_3$ . De (4.12) también se observa claramente el aumento del módulo de ambos términos con el producto  $i(\theta_{off})\Omega$ .

Submodo A-1: En el modo de operación A-1, las variables de control son la amplitud de la corriente y el ángulo de apagado. La amplitud de la corriente se controla entre 0 e  $I_{S,max}$  dado por la (4.7), mientras el ángulo de apagado es controlado entre 0 y  $\beta_s$ . El ángulo de encendido es elegido en modo tal que la corriente alcance el valor de regulación en  $\theta=0$ , es decir

$$\theta_{on} = \frac{-L_u I_s \Omega}{V_N} \quad (4.13)$$

Valores de  $\theta_{on}$  inferiores a (4.13) son inútiles pues sería necesaria una regulación de corriente en una zona en que no se produce cupla. El mínimo valor del ángulo de encendido se alcanza en el límite entre los modos de operación A y B ( $I_S \Omega = I_m \Omega_N$ ), y esta dado por

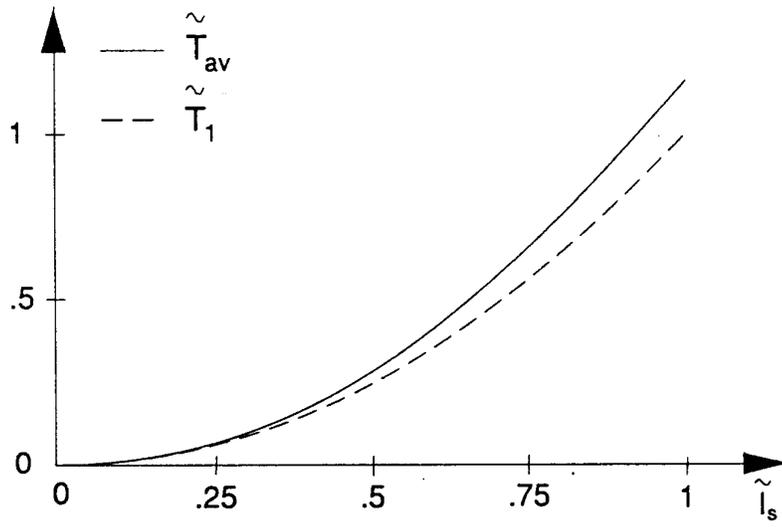
$$\theta_{on,min} = - \frac{L_m}{K} \quad (4.14)$$

valor que es superior a  $-\theta_1$  en los motores usuales.

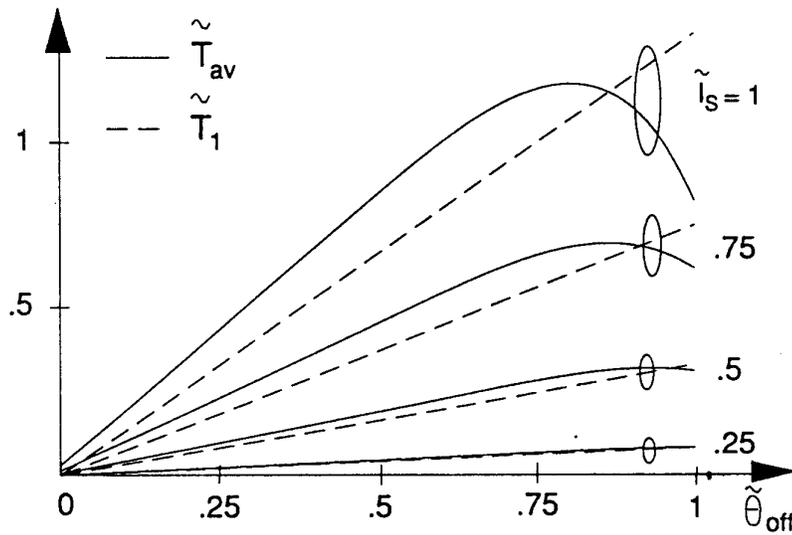
Cuando  $I_s$  se mantiene constante entre 0 y  $\theta_{off}$ ,  $T_1$  es igual a la cupla media desarrollada por un accionamiento con alimentación de corriente, cuando  $\theta_{on}=0$ . Sumando los términos  $T_1, T_2$  y  $T_3$  se obtiene la cupla media total. Las relaciones entre el par medio desarrollado y las variables de control se presentan en forma normalizada en la Figura 4.5, donde también se muestra el término  $T_1$  (línea de trazos) a los efectos de comparar el término efectivamente controlable  $T_1$  con los efectos inevitables de los términos  $T_2$  y  $T_3$ . Todas las curvas están trazadas para velocidad nominal, mientras aquellas de la Figura 4.5 a) fueron calculadas para un ángulo de apagado igual al paso del motor ( $\epsilon=0.75\beta_s$ ).

La Figura 4.5 muestra que  $T_1$  prevalece sobre la suma de  $T_2$  y  $T_3$ , en modo tal que existe una relación casi cuadrática entre la cupla media desarrollada y la corriente estática, y una relación prácticamente lineal con respecto al ángulo de apagado. En particular, la Figura 4.5 b) indica que la contribución de  $T_2$  más  $T_3$  se hace más apreciable para altas corrientes, presentando un máximo para  $\theta_{off}$  cercano a  $\alpha_r/q$ . Las formas de onda de corriente de la Figura 4.3 a), y los resultados de la Figura 4.5 demuestran que un accionamiento, alimentado en tensión, operando en modo A-1 reproduce, con buena aproximación, a un accionamiento con alimentación de corriente.

Submodo A-2: En el submodo de operación A-2, las variables de control son los ángulos de encendido y apagado. El primero es controlado desde un valor negativo hasta  $\beta_s$ . Para velocidades inferiores a la nominal, el mínimo ángulo de encendido está dado por la (4.13) evaluada en  $I_S=I_m$ , pues para valores inferiores se tiene el submodo A-1; para velocidades mayores el límite coincide con (4.14) pues si



a)



b)

Figura 4.5 Relaciones de control en el sub-modo A-1

se toman valores inferiores se entra en el modo B. El ángulo de apagado es controlado entre 0 y  $\beta_s$ , cuando el de encendido es menor que 0; y entre  $\theta_{on}$  y  $\beta_s$  en caso contrario.

La cupla desarrollada en función de las variables de control, se presenta en forma normalizada en la Figura 4.6 a) y b), donde se incluye el término  $T_1$  (línea de trazos) como comparación. Las curvas de la Figura 4.6 a) han sido trazadas para  $\theta_{off}=\epsilon$  y están interrumpidas en el valor mínimo del ángulo de encendido cuando corresponde. Las curvas de la Figura 4.6 b) corresponden a velocidad nominal. Los resultados de la Figura 4.6 a) demuestran que el ángulo de encendido puede ser utilizado como una variable de control efectiva en un accionamiento con alimentación de tensión. Además ilustran que la relación entre el par desarrollado y el ángulo de encendido depende fuertemente de la velocidad de funcionamiento.

### Modo B

En el modo de operación B la corriente tiene la forma indicada en la Figura 4.3 c), con una amplitud que decrece hacia (4.7) b). Dado que este valor corresponde a la máxima corriente que puede obtenerse en el modo A, la operación en modo B aumenta la capacidad de cupla del accionamiento.

Las variables de control son los ángulos de encendido y apagado. El primero es controlado desde un mínimo valor igual a  $-\theta_1$ , hasta un máximo dado por (4.14). A cada ángulo de encendido le corresponde una única corriente para  $\theta=0$ , y resulta conveniente denominar  $I_s$  a este valor de corriente cuando el motor opera en el modo B. Dado que ambos valores están relacionados por la (4.13), no existe diferencia en considerar la amplitud de la corriente, en lugar del ángulo de encendido como variable de control.  $I_s$  es controlada desde un valor mínimo dado por (4.7), hasta un máximo que coincide con  $I_m$  mientras el ángulo de encendido sea mayor que  $-\theta_1$ . Este ángulo es el mínimo valor que puede tomar  $\theta_{on}$ , y determina una velocidad límite en la que el cumplimiento de  $\theta_{on} > -\theta_1$ , conduce a una reducción del máximo valor de corriente, esta velocidad es igual a:

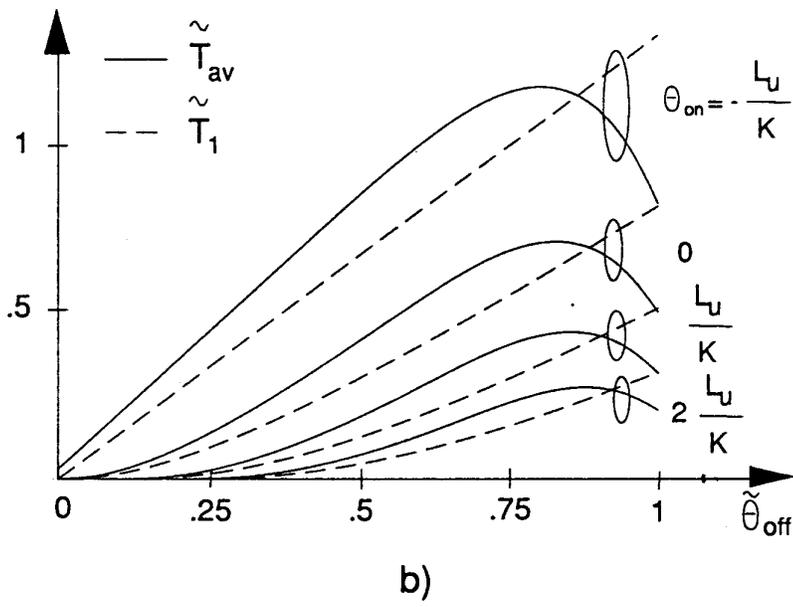
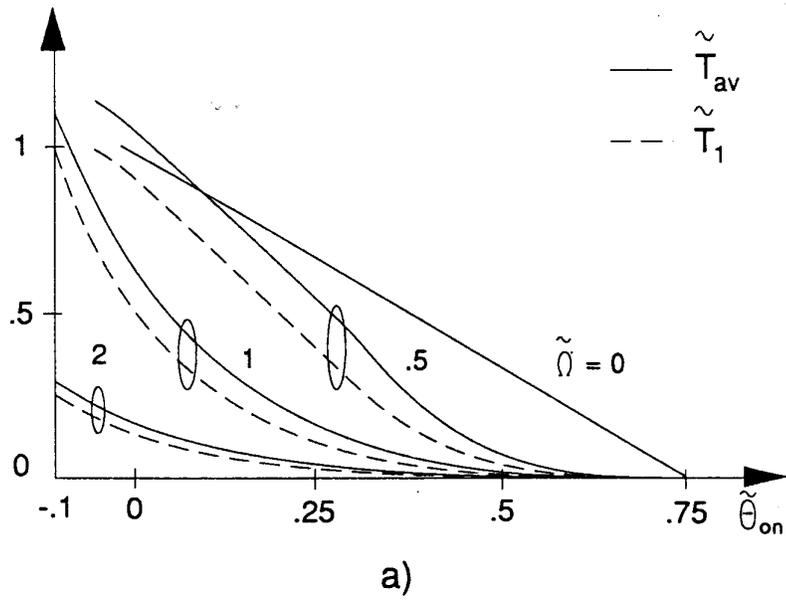


Figura 4.6 Relaciones de control en el submodo A-2

$$\Omega_{V,I} = \frac{V_N \theta_1}{L_u I_m} \quad (4.15)$$

para el motor considerado en los cálculos  $\Omega_{V,I}=8\Omega_N$ .

El ángulo de apagado es controlado desde 0 hasta un valor máximo igual al mínimo entre  $\beta_s$  y el que se obtiene con la restricción que la corriente en la fase debe extinguirse antes de volver a aplicar tensión positiva a la misma ( $\theta_e - \theta_{on} < \alpha_r$ ). En el modo B los intervalos de energización y desenergización tienen igual ancho, dado que el generador de tensión queda completamente aplicado en ambos. De la restricción de extinción y esta igualdad surge

$$\theta_{off,max} = MIN \left( \beta_s, \frac{\alpha_r}{2} + \theta_{on} \right) \quad (4.16)$$

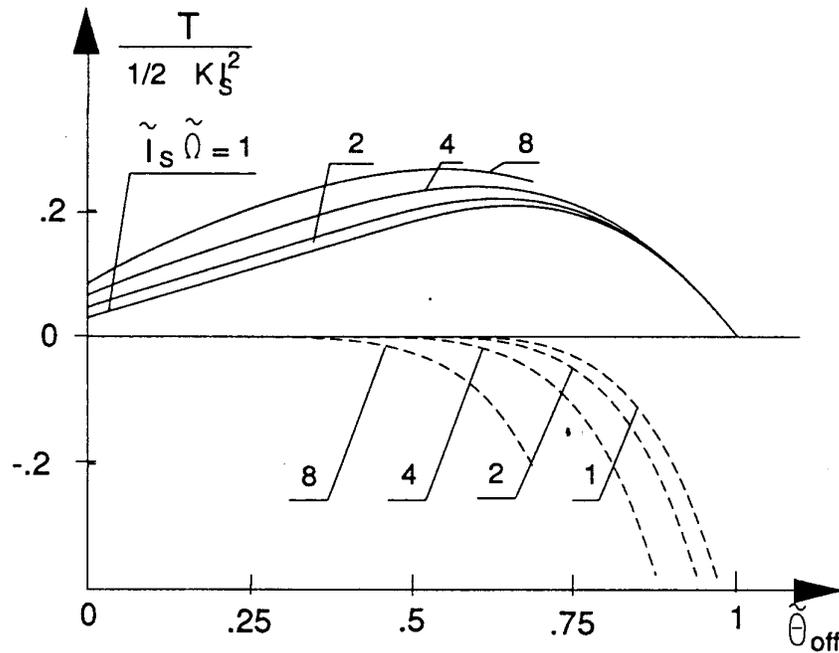


Figura 4.7 Términos de cupla  $T_2$  y  $T_3$  en modo B

Los términos de cupla  $T_2$  y  $T_3$ , también en este caso dependen del ángulo de apagado, la velocidad, y la corriente en el instante de apagado. dado que  $i(\theta_{off})$  está estrechamente relacionada a  $I_S$ , es más significativo expresar estos términos en función de  $I_S$ . En la Figura 4.7 se presentan los términos  $T_2$  (línea llena) y  $T_3$  (línea de trazos) en forma relativa a la cupla producida por  $I_S$ , las curvas se interrumpen en  $\theta_{off}=\theta_{off,max}$ . La Figura 4.7 muestra un comportamiento muy similar al exhibido en el modo A. Esto se debe a que en el modo B el intervalo de extinción es igual a

$$\theta_s - \theta_{off} = \theta_{off} + \frac{L_u I_S \Omega}{V_N} \quad (4.17)$$

el cual se incrementa con el ángulo de apagado y el producto a  $I_S\Omega$ .

Sumando los términos  $T_1$ ,  $T_2$  y  $T_3$ , se obtiene la cupla media producida operando en modo B. La relación entre el par desarrollado y las variables de control se presenta en forma normalizada en la Figura 4.8 a) y b), en la cual se incluye también  $T_1$  (línea de trazos) a modo de comparación. Las curvas de la Figura 4.8 a) fueron trazadas para  $\theta_{off}=\varepsilon$ , excepto la correspondiente a  $\Omega=8\Omega_N$ , que fuera trazada para  $\theta_{off}=\theta_{off,max}$ . La curva para  $\Omega=\Omega_N$  representa el límite de funcionamiento entre los modos A y B. Las demás curvas comienzan de los puntos  $P_1$  y  $P_2$  pertenecientes a la curva límite, pues el modo B no existe por debajo de estos puntos. Las curvas de la Figura 4.8 b) fueron trazadas para  $I_S=I_m$  y se extienden desde 0 hasta  $\theta_{off,max}$ .

En la Figura 4.8 a), las ordenadas de los puntos  $P_1$  y  $P_2$  representan las cuplas máximas desarrolladas en el modo A para las correspondientes velocidades, por lo tanto los segmentos indicados en la figura, son una medida del aumento de cupla que es posible lograr operando en el modo B.

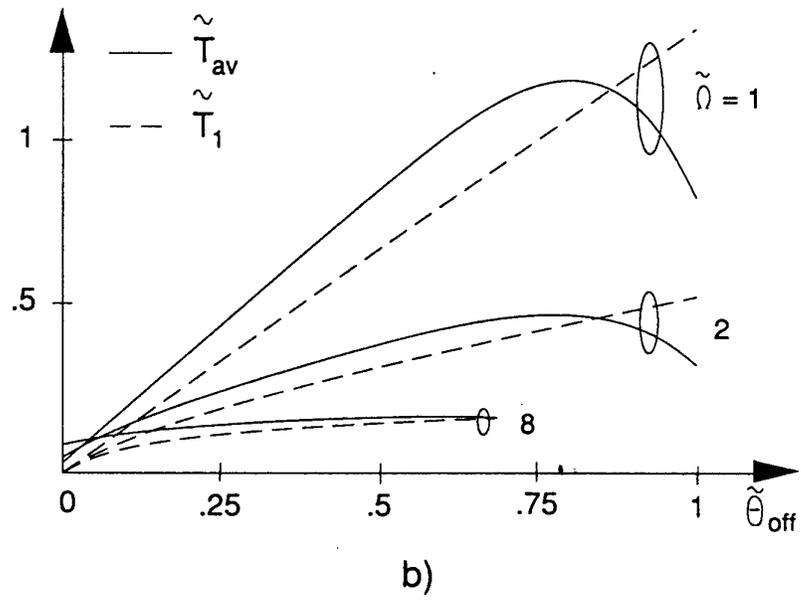
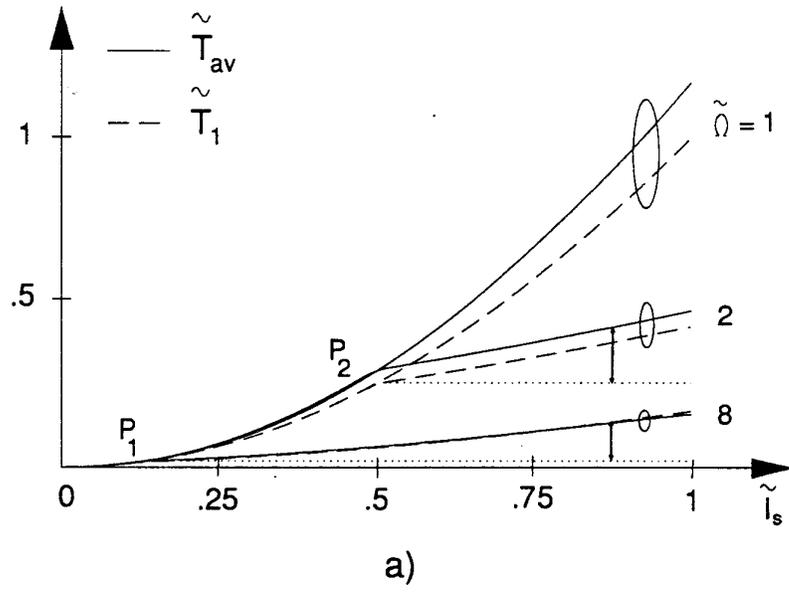
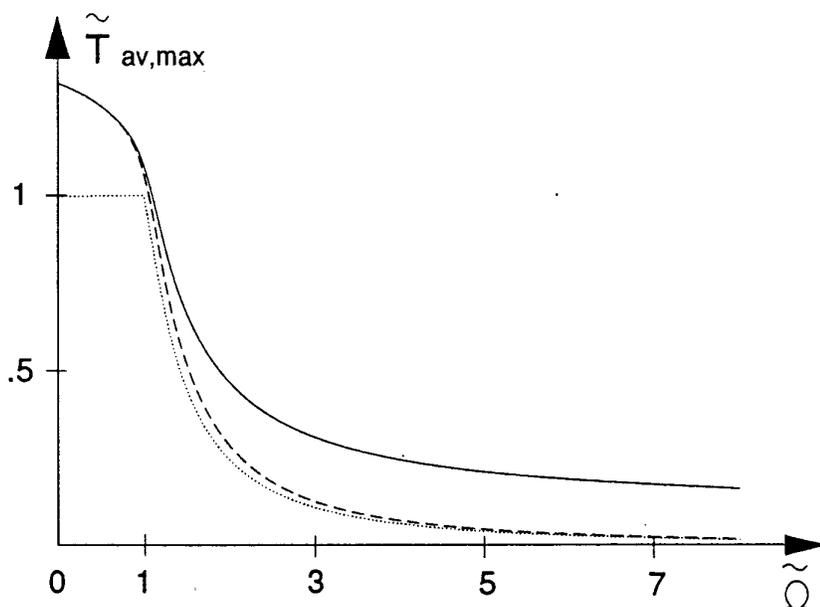


Figura 4.8 Relaciones de control en modo B

### 4.2.2.3 Máximo par desarrollable



**Figura 4.9** Características de cupla-velocidad para un accionamiento con alimentación de tensión

Para velocidades inferiores a la nominal, el accionamiento desarrolla el máximo par, cuando la corriente es regulada en el valor  $I_m$  desde 0 hasta el ángulo de apagado. Para velocidades mayores que la nominal, la cupla máxima se obtiene cuando la corriente en  $\theta=0$  es igual a  $I_m$ . El ángulo de apagado que garantiza la obtención de la cupla máxima varía con la velocidad. Este tiende a  $\beta_s$  cuando la velocidad se acerca a cero, y queda limitado por  $\theta_{off,max}$  en altas velocidades. Las características de cupla-velocidad resultantes se muestran con línea llena en la Figura 4.9, junto con las características correspondientes a un accionamiento con alimentación de corriente (línea punteada), y a la máxima cupla obtenible con un accionamiento con alimentación de tensión, operando en modo A (línea de trazos). Las curvas de la Figura 4.9 confirman las ventajas del accionamiento con alimentación de tensión por encima de la velocidad nominal, donde la operación en el modo B permite un considerable aumento de la cupla producida, logrando una operación a potencia aproximadamente constante en el rango de velocidades entre  $\Omega_N$  y  $\Omega_{V,1}$ . Para velocidades inferiores a la nominal, el

accionamiento con alimentación de tensión también supera al correspondiente con alimentación de corriente, principalmente debido a la contribución del término  $T_2$ .

### **4.3 OPERACIÓN EN LA ZONA CON SATURACIÓN MAGNÉTICA**

En esta sección se pone énfasis en la influencia de la saturación magnética en las características de control del SRM. Para ello se considera el modelo completo tal como fuera desarrollado en la Sección 3.2. Dado que en los SRMs comerciales la corriente nominal es siempre menor que  $\Gamma_m$ , en lo sucesivo no se tendrá en cuenta el modelo para corrientes superiores a este valor.

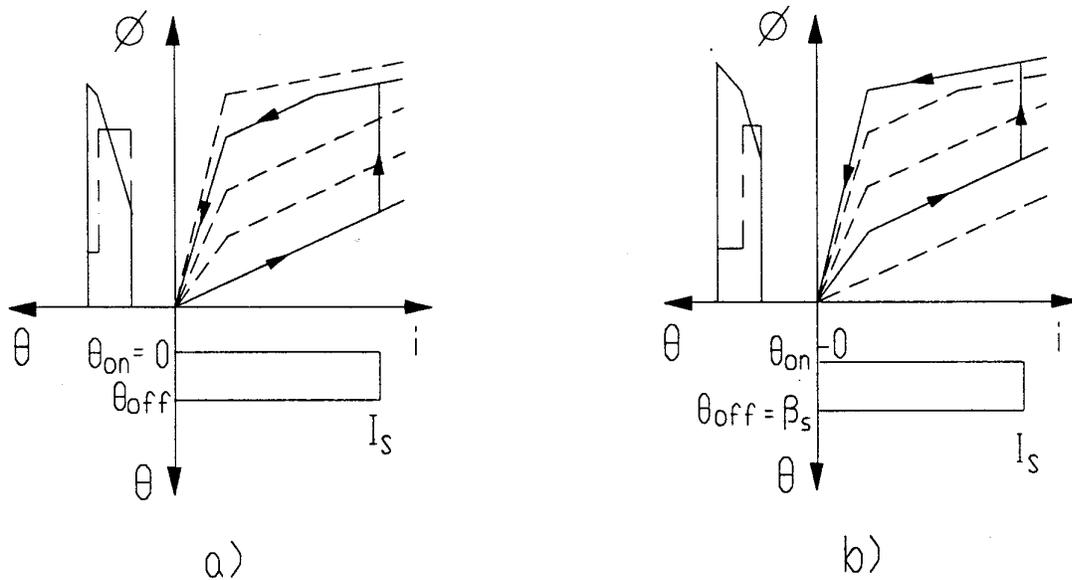
Para el cálculo de la cupla media desarrollada por el motor, en lugar de calcular la cupla instantánea e integrarla sobre el arco polar rotórico; se hará uso de la ecuación de equilibrio de energía descrita en la Sección 3.1.2, por la cual la cupla media resulta

$$T_{av} = \frac{q}{\alpha_r} \oint i d\phi \quad (4.18)$$

y el análisis se basa esencialmente en el estudio de las trayectorias descritas en el plano flujo concatenado por una fase y corriente circulante en la misma ( $\phi$ - $i$ ).

#### **4.3.1 Alimentación con fuente de corriente**

Las trayectorias generadas por un accionamiento con alimentación con fuente de corriente, en el plano  $\phi$ - $i$  a lo largo de un ciclo de trabajo, pueden ser trazadas rápidamente pues la corriente es conocida. En la Figura 4.10, se exponen trayectorias típicas de estos accionamientos en operación motora. Además, se incluyen en la figura, los diagramas temporales de la corriente, el flujo y la tensión (línea de trazo-punto). Como puede apreciarse, la corriente es forzada sobre la fase en el instante de encendido ( $\theta_{on}$ ) y es removida en el instante de apagado ( $\theta_{off}$ ). El intervalo de conducción se halla siempre dentro de la zona de inductancia creciente. Las dos figuras han sido trazadas para la misma amplitud de corriente y el mismo intervalo de conducción; pero mientras



**Figura 4.10** Trayectorias y diagramas de tensión corriente y flujo, para un accionamiento con alimentación de corriente

en la Figura 4.10 a) el ángulo de encendido es igual a 0, en la Figura 4.10 b) el ángulo de apagado se ha hecho igual a  $\beta_s$ . Una comparación de las dos trayectorias de la Figura 4.10, indica que un aumento del ángulo de encendido empuja al punto de trabajo hacia la zona de alta saturación magnética, reduciendo el área encerrada por la trayectoria y por lo tanto también la cupla media desarrollada. Este hecho determina la conveniencia de fijar el ángulo de encendido en 0, y dejar a la amplitud de corriente y el ángulo de apagado como variables de control. La primera varía entre 0 y la corriente nominal  $I_N$ , mientras el segundo lo hace entre 0 y la amplitud del paso ( $\epsilon$ ), para evitar la conducción simultánea de dos fases.

Despreciando los picos de tensión debidos a la transición abrupta de la corriente, la tensión de alimentación de las fases iguala a la  $f_{cem}$  durante el intervalo de conducción, es decir:

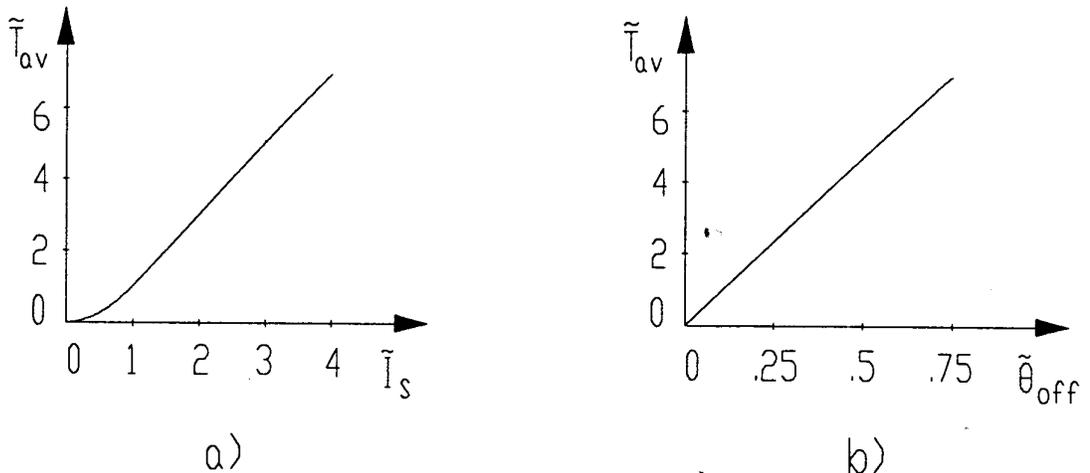
$$v = \begin{cases} K I_s \Omega & I_s \leq I_m & (a) \\ K I_m \Omega & I_s > I_m; \phi \leq \Phi_m & (b) \\ \sigma K I_m \Omega & I_s > I_m; \phi > \Phi_m & (c) \end{cases} \quad (4.19)$$

y es nula en cualquier otro intervalo.

El par medio desarrollado está dado por el área encerrada por la trayectoria de la Figura 4.10 a) y puede ser expresado como:

$$T_{av} = \begin{cases} \frac{qK}{2\alpha_r} I_s^2 \theta_{off} & I_s \leq I_m \quad (a) \\ \frac{qK}{2\alpha_r} \left( I_m I_s - \frac{I_m^2}{2} \right) \theta_{off} & I_s > I_m; \phi(\theta_{off}) \leq \Phi_m \quad (b) \\ \frac{qK}{2\alpha_r} \left\{ \sigma I_m I_s - \frac{I_m^2}{2} + (1-\sigma) \left[ \frac{\Gamma I_m^2}{2} - \frac{L_u}{K\theta_{off}} \left[ \frac{(\Gamma I_m - I_s)^2}{2} + \frac{1}{2} \left( \frac{K\theta_{off} I_m}{L_u} \right)^2 \right] \right] \right\} \theta_{off} & I_s > I_m; \phi(\theta_{off}) > \Phi_m \quad (c) \end{cases} \quad (4.20)$$

Las ecuaciones (4.20) indican que la cupla media correspondiente a la alimentación con fuente de corriente es una función cuadrática de la corriente, mientras



**Figura 4.11** Relaciones de control para un accionamiento con alimentación de corriente y saturación magnética

ésta sea menor que  $I_m$ , para pasar a una dependencia lineal mientras se encuentra en la zona de baja saturación, y volver a una función cuadrática, pero con curvatura negativa, cuando el motor entra en la zona de alta saturación. En la Figura 4.11 a) se muestra, en forma normalizada, la cupla en función de la corriente evaluada para un ángulo de apagado igual al máximo. En la Figura 4.11 b) se muestra, en forma normalizada, la cupla media en función del ángulo de apagado, cuando la amplitud de la corriente es igual a su valor límite ( $I_N$ ). La dependencia de la cupla media con el ángulo de apagado es lineal hasta que el motor entra en la zona de alta saturación, donde cambia por una ley cuadrática.

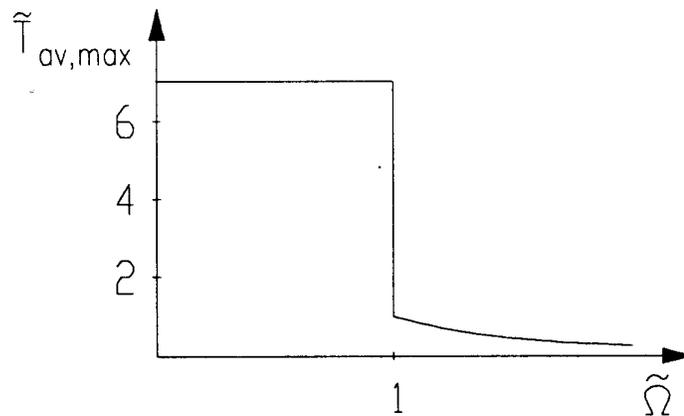
Se obtiene la máxima cupla cuando se alimenta al motor con una corriente igual a  $I_N$ , y se mantiene el ángulo de apagado igual a  $\epsilon$ . En estas condiciones el flujo en el instante de apagado supera al valor de saturación y por lo tanto la cupla está dada por (4.20) c), con  $I_S=I_N$  y  $\theta_{off}=\epsilon$ . Esta cupla puede ser desarrollada hasta una velocidad en que la  $f_{cem}$  supera a la tensión nominal del motor. Dado que la  $f_{cem}$  máxima en estas condiciones está dada por la (4.19) b), la velocidad resulta igual a  $V_N/KI_m$ , que coincide con la velocidad nominal definida en (4.6). Por encima de esta velocidad la corriente debe ser disminuida por debajo del valor de saturación  $I_m$ , para no superar la tensión nominal. Esto implica que el motor, alimentado en corriente, solo puede funcionar en zona lineal para velocidades superiores a la nominal. La  $f_{cem}$  ahora está dada por la (4.19) a), y la máxima corriente debe ser disminuida en correspondencia, resultando

$$I_{S,max} = \begin{cases} I_N & \Omega \leq \Omega_N & (a) \\ I_m \frac{\Omega_N}{\Omega} & \Omega > \Omega_N & (b) \end{cases} \quad (4.21)$$

Sustituyendo (4.21) en (4.20) y haciendo  $\theta_{off}=\epsilon$  resulta una cupla máxima igual a:

$$T_{cv,max} = \begin{cases} \frac{K}{2} \left\{ \sigma I_m I_N - \frac{I_m^2}{2} + (1-\sigma) \left[ \frac{\Gamma I_m^2}{2} - \frac{qL_u}{\alpha K} \left[ \frac{(\Gamma I_m - I_N)^2}{2} + \frac{1}{2} \left( \frac{K\alpha I_m}{qL_u} \right)^2 \right] \right] \right\} & \Omega \leq \Omega_N & (a) \\ \frac{1}{2} K I_m^2 \left( \frac{\Omega_N}{\Omega} \right)^2 & \Omega > \Omega_N & (b) \end{cases} \quad (4.22)$$

Esta cupla se presenta en forma normalizada en la Figura 4.12.



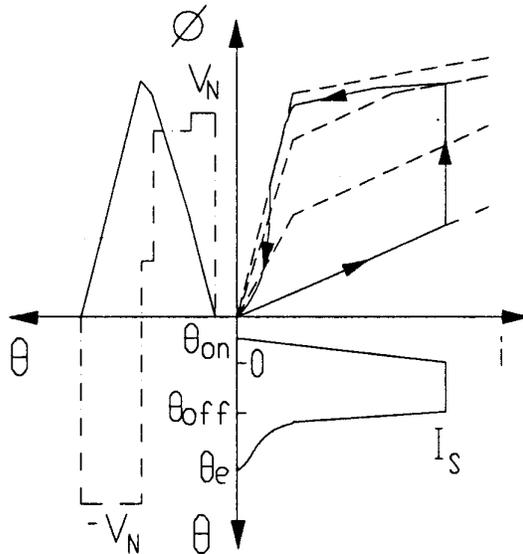
**Figura 4.12** Características cupla-velocidad de un accionamiento con alimentación de corriente

### 4.3.2 Alimentación con fuente de tensión

#### 4.3.2.1 Descripción del funcionamiento

Las trayectorias generadas por un accionamiento alimentado con fuente de tensión, en el plano  $\phi$ - $i$  a lo largo de un ciclo de trabajo, pueden ser encontradas calculando el flujo concatenado por una fase como función de la posición rotórica y la tensión aplicada.

En la Figura 4.13 se muestra una trayectoria típica de funcionamiento motor en baja velocidad, junto con los diagramas temporales de corriente, flujo concatenado y tensión (línea de trazo y punto). Los diagramas representan a las variables de una fase a lo largo de un ciclo de trabajo. En el ángulo de encendido ( $\theta_{on}$ ) el generador de tensión es aplicado plenamente sobre la fase, para establecer una corriente en la fase lo más rápidamente posible. Entre 0 y  $\theta_{off}$ , la corriente es regulada en el valor deseado, conmutando la tensión en un valor igual a (4.19) b) mientras se encuentra en la zona de baja saturación, e igual a (4.19) c) cuando entra en la zona de alta saturación. En el ángulo  $\theta_{off}$  comienza el intervalo de desenergización en el cual el generador de tensión es plenamente aplicado sobre la fase pero con polaridad negativa, para extinguir



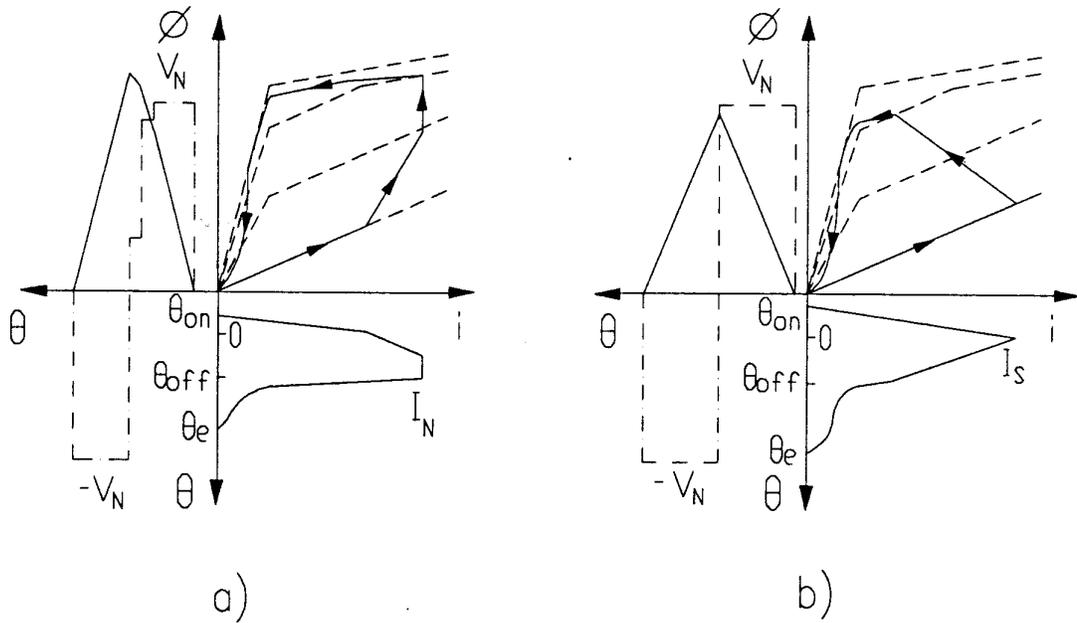
**Figura 4.13** Trayectoria y diagramas correspondientes a un accionamiento alimentado con tensión y funcionando en baja velocidad

rápida la corriente. El ciclo de trabajo se completa en  $\theta_e$  donde la corriente se anula.

Al igual que en la zona lineal pueden distinguirse dos modos de operación, A y B, según la  $f_{cem}$  sea mayor o menor que la amplitud de la tensión del generador en el intervalo entre 0 y  $\theta_{off}$ . A diferencia de lo que ocurre en la región lineal, el límite entre ambos modos de funcionamiento es la velocidad nominal. Esto se debe a que mientras la corriente sea mayor que el valor de saturación  $I_m$ , la  $f_{cem}$  está dada por la (4.19) b) la cual solo depende de la velocidad, y no de la corriente que circula por la fase.

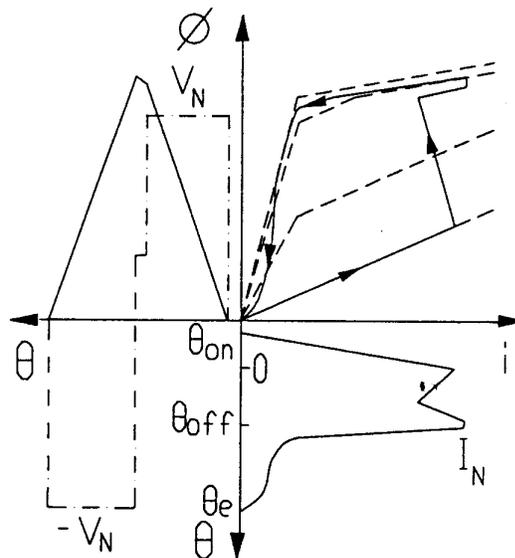
Mientras el accionamiento trabaja en modo A, la corriente tiende a crecer y debe ser controlada conmutando el generador de tensión. Se pueden distinguir dos submodos de operación: A-1 y A-2, según cual sea el valor en que se controla la corriente. En el submodo A-1, la corriente es controlada a lo largo de todo el intervalo  $0-\theta_{off}$ , en un valor cualquiera entre 0 e  $I_N$ . Una trayectoria típica del submodo A-1 es la mostrada en la Figura 4.13. El submodo A-2 se caracteriza por el hecho que la corriente solo es controlada en el caso que alcance su valor máximo  $I_N$ , como se muestra en la Figura 4.14 a).

El modo B tiene lugar para velocidades mayores que la nominal, y se caracteriza por el hecho que el generador de tensión está plenamente aplicado durante todo el ciclo de trabajo. Primero con polaridad positiva en el intervalo de energización y luego con



**Figura 4.14** Trayectorias y diagramas correspondientes al submodo A-2 y al modo B.

polaridad negativa durante la desenergización. Dado que la amplitud de tensión es la misma en ambos intervalos, también lo debe ser su duración. Entre 0 y  $\theta_{off}$ , la corriente disminuye debido a que la  $f_{cem}$  es mayor que la tensión de alimentación. Una trayectoria y diagramas típicos del modo B son los presentados en la Figura 4.14 b).



**Figura 4.15** Trayectoria y diagramas temporales para una situación atípica.

Una situación anómala puede ocurrir cuando se opera en modo B cerca de la

velocidad nominal. En esta circunstancia, cuando el motor entra en la zona de alta saturación la  $f_{cem}$  cae del valor indicado por la (4.19) b) hasta el correspondiente a (4.19) c); si la tensión del generador es superior a este último valor, la corriente vuelve a crecer y se hace necesario conmutar el generador para limitarla. La trayectoria y diagramas correspondientes a esta situación son los mostrados en la Figura 4.15.

Una propiedad interesante de las trayectorias en la zona de saturación puede ser descripta calculando la pendiente de estas trayectorias. Si se desprecia la caída de tensión en la resistencia de la fase, la tensión aplicada es igual a la derivada temporal del flujo concatenado. De esta relación puede obtenerse el diferencial de posición

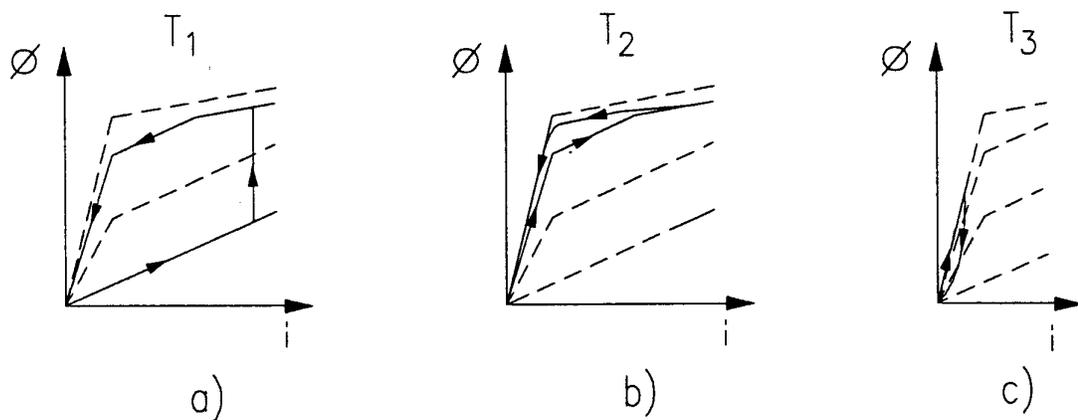
$$d\theta = \frac{\Omega}{v} d\phi \quad (4.23)$$

este diferencial es sustituido en la ecuación del diferencial de flujo obtenido derivando las ecuaciones del modelo presentado en la Sección 3.2, y de este modo se tiene la pendiente de las trayectorias para corrientes mayores que la de saturación

$$\frac{d\phi}{di} = \begin{cases} \frac{L_u}{1 \mp \frac{K I_m \Omega}{v}} & \phi \leq \phi_m & (a) \\ \frac{\sigma L_u}{1 \mp \frac{\sigma K I_m \Omega}{v}} & \phi > \phi_m & (b) \end{cases} \quad (4.24)$$

donde el signo - corresponde a excitación en la zona de inductancia creciente, mientras el signo + representa a excitación en la zona de inductancia decreciente. Dado que  $v$  toma valores constantes por tramos, las trayectorias están formadas por líneas rectas cuya pendiente depende del valor de la tensión de alimentación del motor. Cuando la corriente es regulada,  $v$  iguala a la  $f_{cem}$  conduciendo a una pendiente infinita que representa una línea vertical en el plano  $\phi$ - $i$ . En la zona lineal no es posible encontrar una expresión simple para las trayectorias debido a que el flujo es una función del producto  $i\theta$ .

Para calcular la cupla media desarrollada por el motor se puede dividir al ciclo de trabajo en cinco ciclos elementales trabajando separadamente en los intervalos:  $[\theta_{on}-0]$ ,  $[0-\theta_{off}]$ ,  $[\theta_{off}-\beta_s]$ ,  $[\beta_s-\beta_r]$ ,  $[\beta_r-\theta_e]$ . En el primer ciclo elemental, la corriente coincide con la real de la fase hasta que es llevada abruptamente a cero en  $\theta=0$ ; en el segundo ciclo la corriente se hace igual a  $i(0)$  en  $\theta=0$ , coincide con la real mientras el rotor se desplaza entre 0 y  $\theta_{off}$ , instante en el cual es llevada a cero; y así se construyen los cinco ciclos en sucesión. Las trayectorias descritas en el primer y cuarto ciclo no encierran ningún área, por lo tanto no se desarrolla ninguna cupla en estos intervalos. Las trayectorias en los demás ciclos encierran un área no nula, lo cual determina que la cupla media desarrollada puede expresarse, al igual que en la operación en la zona lineal, como la suma de tres términos correspondientes a las áreas encerradas por las trayectorias en el segundo, tercero y quinto ciclo respectivamente.



**Figura 4.16** *Trayectorias elementales en el plano  $\phi$ - $i$*

En la Figura 4.16 se exponen las trayectorias elementales. Las dos primeras son recorridas en un sentido antihorario dando lugar a un valor positivo de cupla para  $T_1$  y  $T_2$ . La tercera, en cambio, es recorrida en sentido horario dando lugar a un valor negativo para  $T_3$ , correspondiente a la presencia de corriente en la fase en una zona de inductancia decreciente. De estos tres términos  $T_1$  sigue siendo el más importante y el que es efectivamente controlado, mientras  $T_2$  y  $T_3$  son el resultado de que la corriente necesita de un tiempo para extinguirse. El valor negativo de  $T_3$  reduce la cupla media producida e impone restricciones en la selección del ángulo de apagado.

#### 4.3.2.2 Relación entre la cupla producida y las variables de control

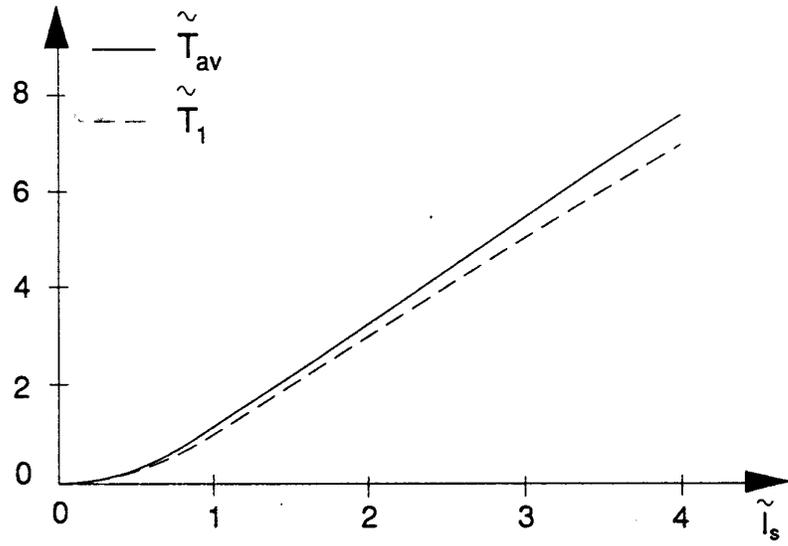
##### **Modo A:**

Al igual que para la operación en zona lineal, en el modo de operación A pueden distinguirse dos submodos según cuáles sean las variables efectivas de control.

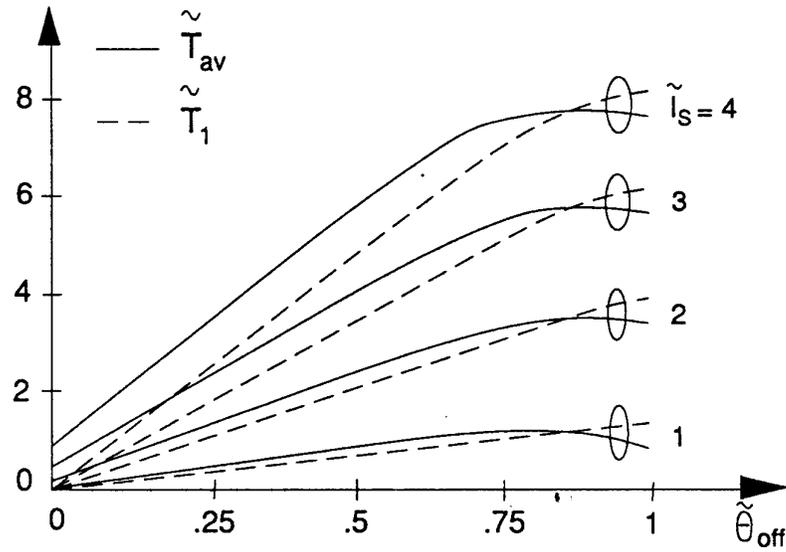
Submodo A-1: En el submodo A-1 las variables de control son la amplitud de la corriente y el ángulo de apagado. La primera es controlada entre 0 y el valor de corriente nominal, mientras el segundo entre 0 y  $\beta_s$ . El ángulo de encendido se elige de acuerdo a (4.13) para obtener la amplitud de corriente deseada en  $\theta=0$ .

En la Figura 4.17 a) y b) se presenta, en forma normalizada, la cupla media desarrollada por el motor en función de las variables de control. En este modo de funcionamiento el término  $T_1$  se corresponde exactamente con la cupla total producida por el motor con alimentación de corriente. Es por ello que se incluye en la figura, en línea de trazos, como comparación de los dos modos de alimentación. Todas las curvas han sido trazadas para  $\Omega=\Omega_N$ ; además en la Figura 4.17 a) se ha fijado  $\theta_{off}=\epsilon$ . En la Figura 4.17 b) puede apreciarse que la contribución de  $T_2$  y  $T_3$  es máxima para corrientes elevadas, debido a que se necesita un tiempo mayor para extinguir la corriente; y presenta un máximo para un ángulo de apagado cercano a  $\epsilon$ . La Figura 4.17 a) muestra que el término  $T_1$  predomina sobre la suma de  $T_2$  y  $T_3$ .  $T_1$  reproduciendo el funcionamiento con alimentación de corriente, está representada por (4.20); y dado que predomina en la cupla total desarrollada, la relación entre ésta y la corriente sigue siendo una función casi cuadrática, para valores de corriente inferiores a  $I_m$  (zona lineal), y es una función prácticamente lineal para valores mayores (zona de saturación). Los resultados de la Figura 4.17 muestran que la operación en el submodo A-1 es una buena aproximación del accionamiento con alimentación de corriente.

Submodo A-2: En el submodo A-2 las variables de control son los ángulos de encendido y apagado. El primero es controlado entre un valor mínimo dado por (4.13) evaluada para  $I_S=I_N$ , dado que por debajo de ese valor se reproduce el funcionamiento en submodo A-1, y un valor máximo fijado en  $\beta_s$ . El ángulo de apagado se controla entre 0 y  $\beta_s$ , manteniéndose siempre superior a  $\theta_{on}$ .



a)



b)

Figura 4.17 Relaciones de control correspondientes al submodo A-1

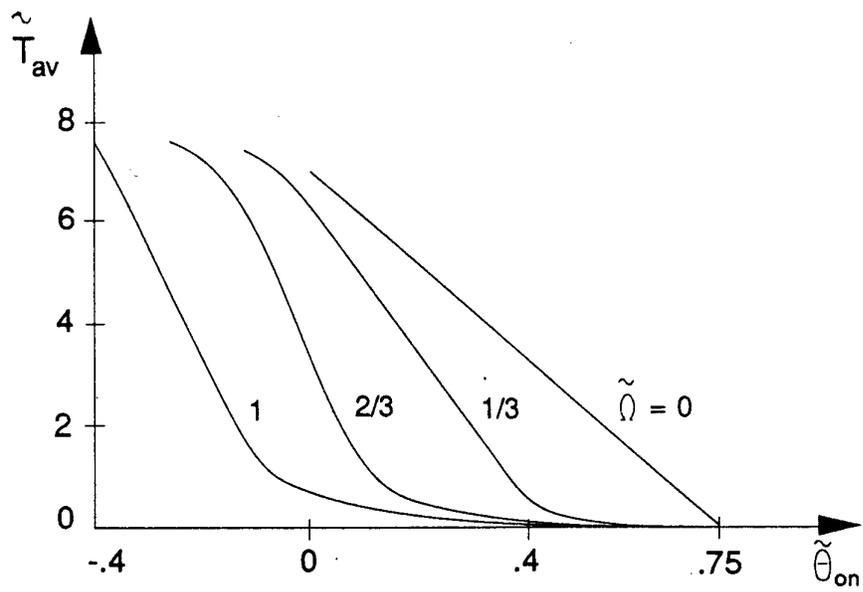
En la Figura 4.18 se presenta, en forma normalizada, el par medio producido por el motor operando en el submodo A-2, en función de las variables de control: el ángulo de encendido en la Figura 4.18 a), y el ángulo de apagado en la Figura 4.18 b). Las curvas de la Figura 4.18 a) han sido trazadas para  $\theta_{off}=\epsilon$ , mientras las curvas de la Figura 4.18 b) corresponden a  $\Omega=\Omega_N$ . Los resultados mostrados en la Figura 4.18 a), prueban que el ángulo de encendido, en un accionamiento con alimentación de tensión, puede ser utilizado como una variable de control efectiva. Estas curvas ilustran que la relación entre la cupla producida y el ángulo de encendido, depende fuertemente de la velocidad de trabajo del motor; pasando de una relación lineal para velocidades cercanas a cero, a funciones no lineales a medida que la velocidad aumenta. Si bien la relación es no lineal, ésta puede aproximarse a una lineal pero debe distinguirse que el rango de control efectivo del ángulo disminuye en amplitud y se desplaza hacia valores menores a medida que la velocidad aumenta.

#### Modo B:

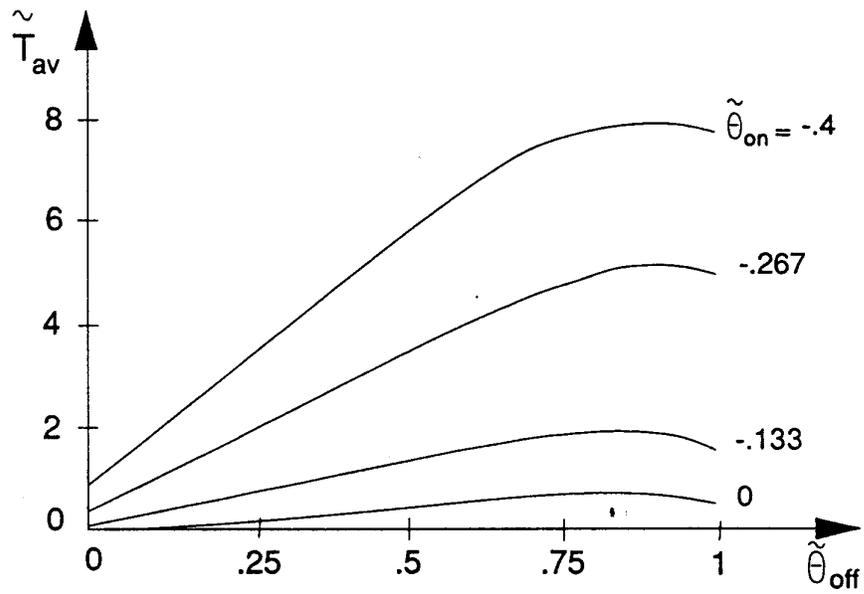
En el modo B las variables de control son los ángulos de encendido y apagado. El primero es controlado entre  $-\theta_1$  y un máximo dado por (4.14), mientras el ángulo de apagado se controla entre 0 y  $\beta_s$ . Dado que el ángulo de encendido está relacionado a la amplitud de corriente en  $\theta=0$ , a través de (4.13), es usual tomar a  $i(0)=I_S$  como la variable de control en lugar de  $\theta_{on}$ . Se puede controlar  $I_S$  entre 0 e  $I_N$ , mientras el ángulo de encendido sea superior a  $-\theta_1$ , es decir hasta una velocidad

$$\Omega_{V,s} = \frac{V_N \theta_1}{L_u I_N} \quad (4.25)$$

a partir de la cual el límite superior de corriente debe ser reducido para satisfacer la condición del mínimo ángulo de encendido. Para el motor con el que se trabajó se cumple que  $\Omega_{V,s} = 2\Omega_N$ . Esta velocidad es sustancialmente inferior al límite determinado en la zona lineal ( $\Omega_{V,l}$ ), debido a que la corriente máxima en ese caso



a)



b)

Figura 4.18 Relaciones de control correspondientes al sub-modo A-2

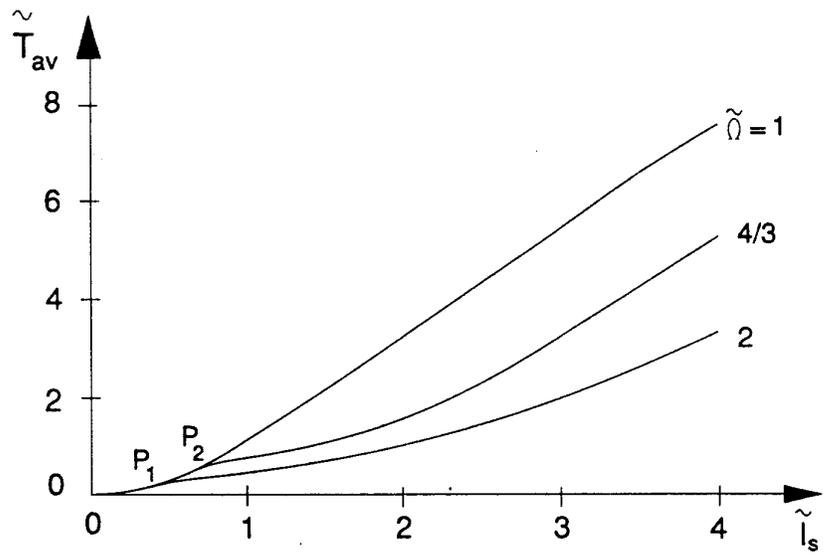
estaba limitada a  $I_m$ .

El ángulo de apagado es controlado desde 0 hasta un valor máximo que en altas velocidades queda limitado por la condición que la corriente en la fase debe extinguirse antes que se aplique tensión positiva nuevamente a la misma fase, es decir que  $\theta_{\text{off,max}}$  sigue estando determinado por (4.16).

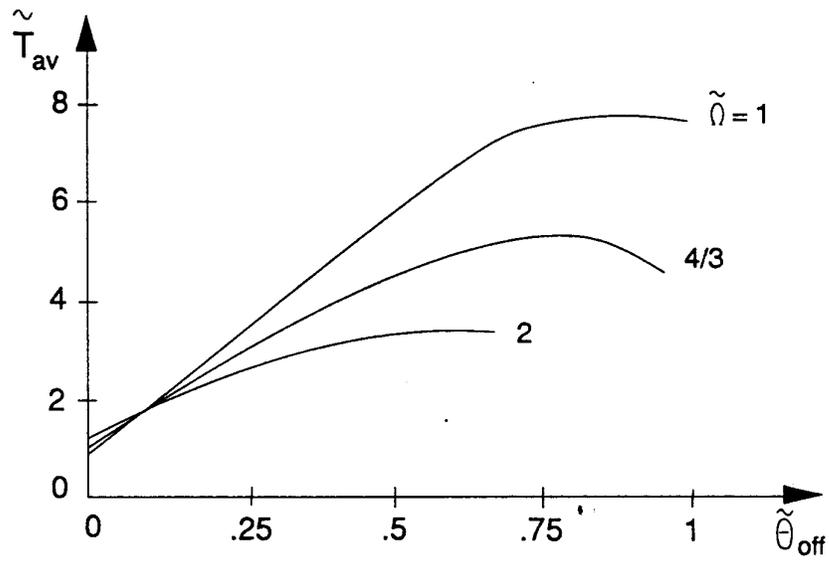
En la Figura 4.19 se presenta, en forma normalizada, el par medio producido por el motor operando en el modo B, en función de las variables de control: el ángulo de encendido, que es equivalente a la corriente  $I_S$  en la Figura 4.19 a), y el ángulo de apagado en la Figura 4.19 b). Las curvas de la Figura 4.19 a) han sido trazadas para  $\theta_{\text{off}}=\epsilon$ , con la excepción de la curva correspondiente a  $2\Omega_N$  que fue trazada para  $\theta_{\text{off,max}}=0.7\beta_s$ . Las curvas de la Figura 4.19 b) corresponden a  $I_S=I_N$  y se extienden desde 0 hasta  $\beta_s$ , salvo la curva correspondiente a  $2\Omega_N$  que se interrumpe en  $\theta_{\text{off,max}}$ . Los puntos  $P_1$  y  $P_2$  en la Figura 4.19 a), representan la transición entre el funcionamiento en zona lineal y en saturación. Las ordenadas de estos puntos corresponden a la cupla máxima desarrollada en el modo A, por lo tanto puede observarse en la figura un aumento sustancial de cupla cuando se opera al motor en el modo B. En este caso el aumento es aún más significativo que en la zona lineal, dado que el modo A para velocidades superiores a la nominal sólo se consigue en zona lineal, es decir que las ordenadas de  $P_1$  y  $P_2$  coinciden con las de la Figura 4.8 a).

#### 4.3.2.3 Máximo par desarrollable

La máxima cupla obtenible con un accionamiento alimentado con tensión puede ser obtenido del siguiente modo. Para velocidades inferiores a la nominal, el accionamiento desarrolla la máxima cupla cuando la corriente en la fase es regulada en su máximo valor entre 0 y  $\theta_{\text{off}}$ ; por encima de la velocidad nominal el ángulo de encendido es elegido de modo tal que la corriente alcance el valor  $I_N$  para  $\theta=0$ . En ambas regiones el ángulo de apagado, que garantiza una cupla máxima, varía con la velocidad. Parte de un valor igual a  $\beta_s$  a baja velocidad para tender a  $\theta_{\text{off,max}}$  a máxima velocidad. Para velocidades intermedias el ángulo de apagado ideal se aparta de su valor máximo para limitar la cupla negativa producida.

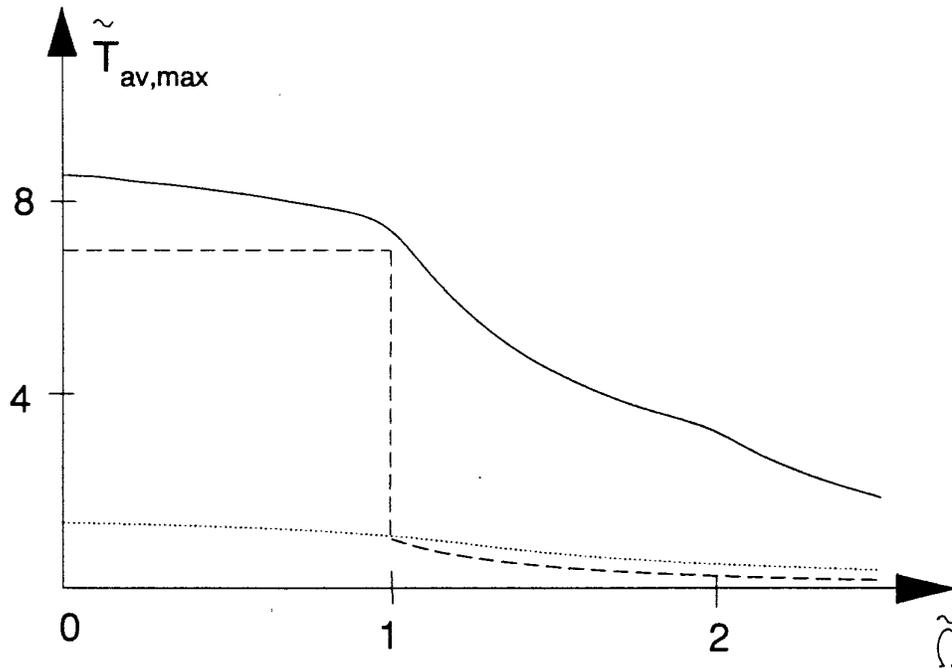


a)



b)

Figura 4.19 Relaciones de control correspondientes al modo B



**Figura 4.20** Características de cupla-velocidad para un accionamiento con alimentación de tensión operando con saturación magnética

En la Figura 4.20 se dibujan las características de cupla-velocidad máximas del SRM. La curva trazada en línea llena corresponde al control descrito en el párrafo anterior; mientras se incluyen además a modo de comparación la característica correspondiente a un accionamiento con alimentación de corriente (línea de trazos), así como la máxima cupla obtenible trabajando solo en la zona lineal (línea de puntos). Las curvas demuestran que para velocidades superiores a la nominal, el accionamiento alimentado con tensión es capaz de desarrollar una cupla sustancialmente mayor que la correspondiente a la alimentación de corriente; y se logra una operación con potencia aproximadamente constante hasta una velocidad igual a  $\Omega_{v,s}$ , por encima de esta velocidad no se tiene más control y la cupla cae con el cuadrado de la velocidad. En el rango de bajas velocidades, el accionamiento con alimentación de tensión también supera al correspondiente con alimentación de corriente debido a la contribución del término  $T_2$ .

#### 4.4 ESQUEMAS DE CONTROL DE VELOCIDAD

En todos los modos de operación considerados anteriormente, las variables de control efectivas son dos: la primera puede ser la amplitud de la corriente, o el ángulo de encendido, mientras que la segunda es el ángulo de apagado. Una estrategia conveniente para controlar al SRM, es usar la primera para controlar la cupla del motor, y elegir el ángulo de apagado tal que el accionamiento desarrolle el máximo par disponible para cada velocidad y nivel de corriente. El problema que surge de esta elección es que el ángulo de apagado debe variar en una forma muy compleja. La solución más directa sería fijar la referencia para este ángulo en el máximo valor que satisface la restricción sobre la extinción de la corriente en todo el rango de velocidades y corrientes, es decir

$$\theta_{off}^* = \frac{\alpha_r}{2} - \theta_1 \quad (4.26)$$

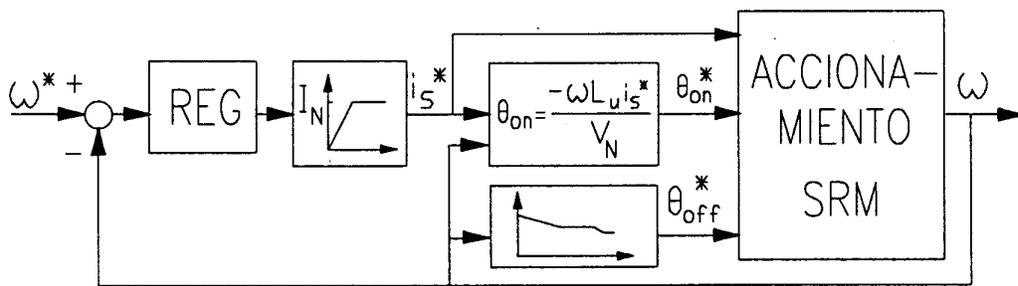
Esta no es una buena solución ya que no se aprovecha la máxima cupla obtenible en un amplio rango de velocidades. Para superar este inconveniente, se puede elegir que el ángulo de apagado varíe con la velocidad del siguiente modo:

$$\theta_{off}^* = \begin{cases} \beta_s - \left( \beta_s - \frac{\alpha_r}{q} \right) \frac{\Omega}{\Omega_N} & 0 \leq \Omega \leq \Omega_N \\ \frac{\alpha_r}{q} & \Omega_N < \Omega \leq \Omega_C \\ \frac{\alpha_r}{2} - \frac{I_N L_u \Omega}{V_N} & \Omega_C < \Omega \leq \Omega_{Vs} \\ \frac{\alpha_r}{2} - \theta_1 & \Omega > \Omega_{Vs} \end{cases} \quad (4.27)$$

donde  $\Omega_C$  es la velocidad para la cual el ángulo de apagado máximo es igual al paso del motor ( $\theta_{off,max}=\epsilon$ ), es decir

$$\Omega_C = \frac{V_N \alpha_r}{L_u I_N} \left( \frac{1}{2} - \frac{1}{q} \right) \quad (4.28)$$

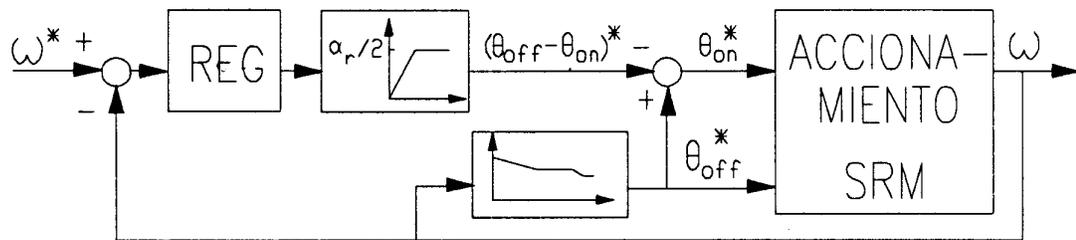
para el motor en análisis resulta  $\Omega_C = 1,87 \Omega_N$ . Con esta elección del ángulo de apagado se obtiene una cupla bastante cercana al máximo posible sobre todo el rango de velocidades, y el control del ángulo no es demasiado complicado.



**Figura 4.21** Esquema de control de velocidad con la variable manipulada interpretada como un requisito de corriente

Es posible concebir distintos esquemas de lazo cerrado para controlar la velocidad de un SRM, según como se interprete la señal de salida del regulador del lazo de control de velocidad. Si la salida del regulador de velocidad es interpretada como un requisito de corriente, el esquema de control puede ser configurado como lo muestra la Figura 4.21. La señal de salida del regulador ingresa a un limitador, establecido en el valor  $I_N$ , para fijar el valor de referencia para la amplitud de la corriente de fase ( $i_s^*$ ). Este valor de referencia ingresa a un regulador de corriente interno al accionamiento, y al sistema de cálculo del ángulo de encendido que la procesa de acuerdo a (4.13). La referencia para el ángulo de encendido así obtenida ( $\theta_{on}^*$ ), garantiza la obtención de la corriente deseada en  $\theta=0$ . Mientras el accionamiento opera en modo A, el regulador de corriente conmuta al generador de tensión para controlar la corriente en el valor deseado. Cuando el accionamiento opera en el modo B, el regulador de corriente no es capaz de

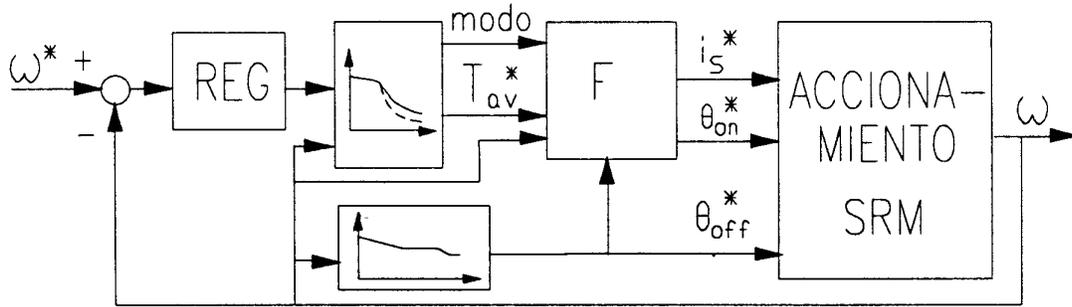
controlarla y automáticamente el generador de tensión queda aplicado sobre la fase adecuada.



**Figura 4.22** Esquema de control de velocidad con la variable manipulada interpretada como un requisito de intervalo de energización

Si la señal de salida del regulador es interpretada como una demanda de un intervalo de energización, el esquema de control puede ser configurado como se ilustra en la Figura 4.22. La variable manipulada ingresa a un limitador construido en base a la restricción del máximo ángulo de extinción; y luego en un sumador, que efectúa la diferencia con el valor del ángulo de apagado, para entregar al accionamiento el valor de referencia para el ángulo de encendido. El regulador de corriente, que se encuentra dentro del accionamiento propiamente dicho, tiene un valor de referencia fijado en  $I_N$ , para evitar que la corriente en las fases supere un valor máximo en el cual el motor opera en modo seguro. Dependiendo de la velocidad y la amplitud de la señal de error, la corriente puede alcanzar su valor máximo para  $\theta < 0$ . Cuando esto sucede, un incremento del intervalo de energización no produce aumento alguno en la cupla motora. Este inconveniente puede ser superado reemplazando al limitador fijo de la Figura 4.22, por otro de amplitud variable igual a  $\theta_{off}^* - \theta_{on}$ , donde  $\theta_{on}$  es calculado con (4.13) evaluada para  $I_S = I_N$ .

Si la señal de salida del regulador es interpretada como una demanda de cupla, el esquema de control puede ser configurado como se ilustra en la Figura 4.22. La señal de salida del regulador ingresa en un limitador construido de acuerdo a las características de cupla máxima mostradas en la Figura 4.20. La salida del limitador es interpretada como una referencia de cupla que es procesada por un bloque funcional (F), que entrega al accionamiento las señales de referencia de corriente y de ángulo de encendido. Las



**Figura 4.23** Esquema de control de velocidad con la variable manipulada interpretada como un requisito de cupla

ecuaciones el bloque funcional dependen de la velocidad y del modo de control que se encuentra activo. Para velocidades inferiores a la nominal, el motor opera en el modo A, y los submodos A-1 y A-2 pueden ser implementados. Para el submodo A-1 la referencia de corriente es calculada de las ecuaciones de cupla dadas por (4.20), evaluada para  $\theta_{off}^*$ . Dado que la ecuación (4.20) b) evaluada para flujos superiores al valor de saturación (pero dentro del régimen nominal), se aparta levemente de la (4.20) c), la (4.20) b) es utilizada en toda la región de saturación magnética sin hacer distinciones entre alta y baja saturación. Las ecuaciones del bloque funcional para el modo A-1 pueden simplificarse en:

$$i^* = \begin{cases} \sqrt{\frac{2 \alpha_r \tau_{av}^*}{q K \left[ \beta_s + \left( \frac{\alpha_r - \beta_s}{q} \right) \frac{\Omega}{\Omega_N} \right]}} & \tau_{av}^* \leq T_{av,m} & (a) \\ \frac{1}{I_m} \left\{ \frac{2 \alpha_r \tau_{av}^*}{q K \left[ \beta_s + \left( \frac{\alpha_r - \beta_s}{q} \right) \frac{\Omega}{\Omega_N} \right]} + \frac{I_m^2}{2} \right\} & \tau_{av}^* > T_{av,m} & (b) \end{cases} \quad (4.29)$$

donde

$$T_{av,m} = \frac{q K}{2 \alpha_r} I_m^2 \theta_{off}^*$$

A partir de (4.29), la referencia para el ángulo de encendido es calculada con la ayuda de (4.13). Para funcionamiento en el submodo A-2, la referencia para el ángulo de encendido es obtenida de las curvas de la Figura 4.18 a), y la referencia de corriente se fija en  $I_N$ .

Para velocidades superiores a la nominal, el modo B se encuentra activo. En este modo, la referencia de corriente es obtenida de las curvas de la Figura 4.19 a), y luego es introducida en (4.13) para calcular la referencia del ángulo de encendido. El cálculo de las señales de referencia tanto en el submodo A-2, como en el modo B prácticamente exigen el uso de tablas de búsqueda, ya que no es posible encontrar una expresión matemática sintética.

De los esquemas propuestos, el presentado en la Figura 4.22 es el de implementación más simple, pero presenta una transferencia no lineal que dificulta el diseño del regulador. El correspondiente a la Figura 4.22 ofrece la ventaja de que la cupla motora es proporcional a la señal de salida del regulador, presentando una transferencia lineal por el lazo de control, pero la implementación del controlador es bastante compleja. El esquema de la Figura 4.21 ofrece una solución intermedia, en la cual, si bien la transferencia no es lineal, se pueden realizar algunas aproximaciones en el diseño del regulador, como se verá en el Capítulo 6.