

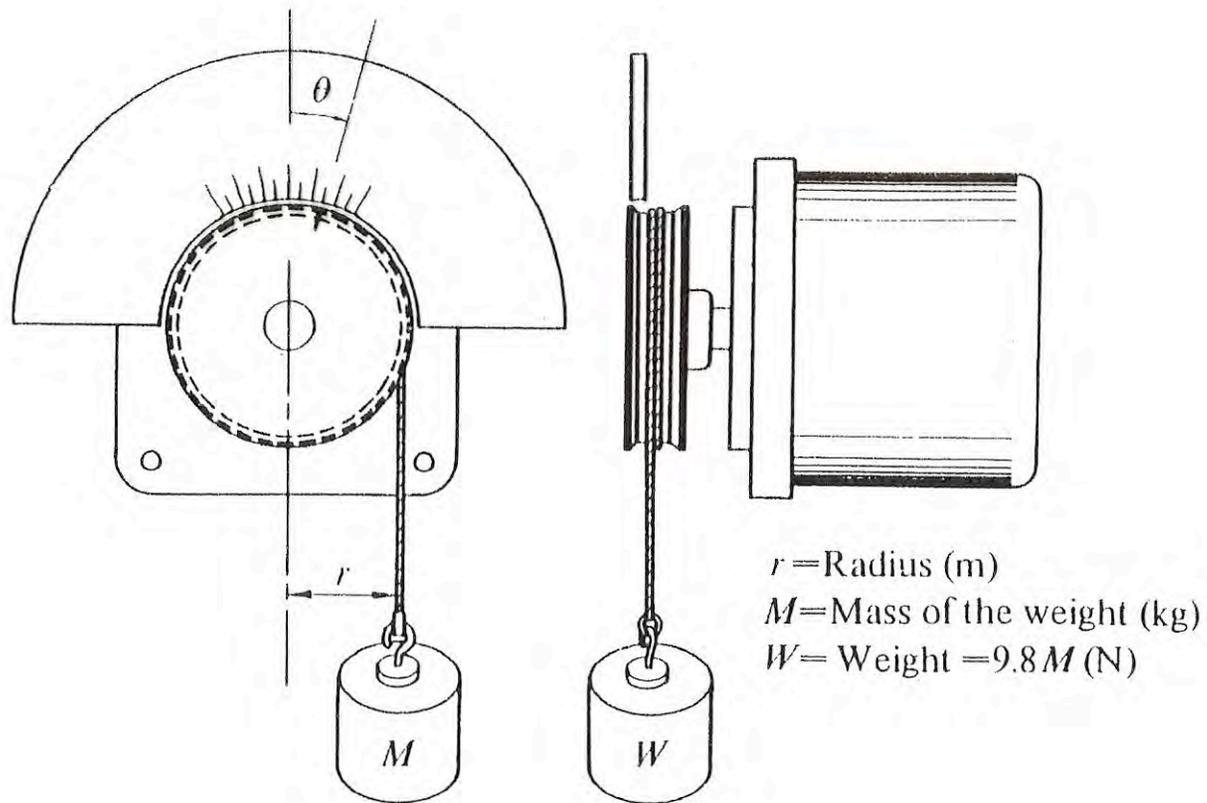
Par de sostenimiento.

Cuando el motor de pasos está en la posición exacta de equilibrio no produce par; si, como es normal, existe un par de carga estático, este desplaza al motor de su posición de equilibrio, lo que automáticamente hace que se produzca un par motriz que trata de reducir el desplazamiento y regresar el motor a la posición de equilibrio; el desplazamiento sigue creciendo hasta que ocurre una de dos cosas:

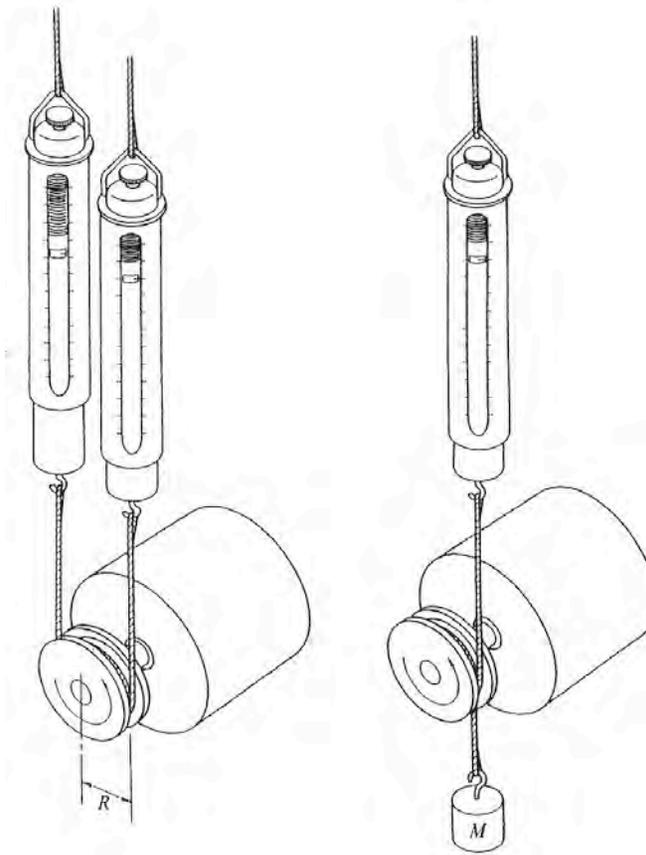
- 1.- El par motriz iguala al par estático de oposición, con lo que el error se estabiliza y el eje del motor queda desplazado un cierto ángulo de su posición de equilibrio.

2.- El par motriz sigue creciendo hasta alcanzar su valor máximo, sin llegar a igualar al par estático de oposición. En esta situación el motor pierde el control y salta por lo menos un paso, en un error que no es recuperable automáticamente.

El valor del par máximo debe ser indicado por el fabricante en la placa del motor, pero si esta información no está disponible, el par de sostenimiento se puede determinar mediante una prueba relativamente simple, sobre todo si el motor es de baja potencia/bajo par.



Prueba para medir el par de sostenimiento de un motor de pasos.



Prueba para medir el par dinámico de un motor de pasos con dos dinamómetros (izquierda) o con un dinamómetro y un peso (derecha).

Error de posición debido al par de carga.

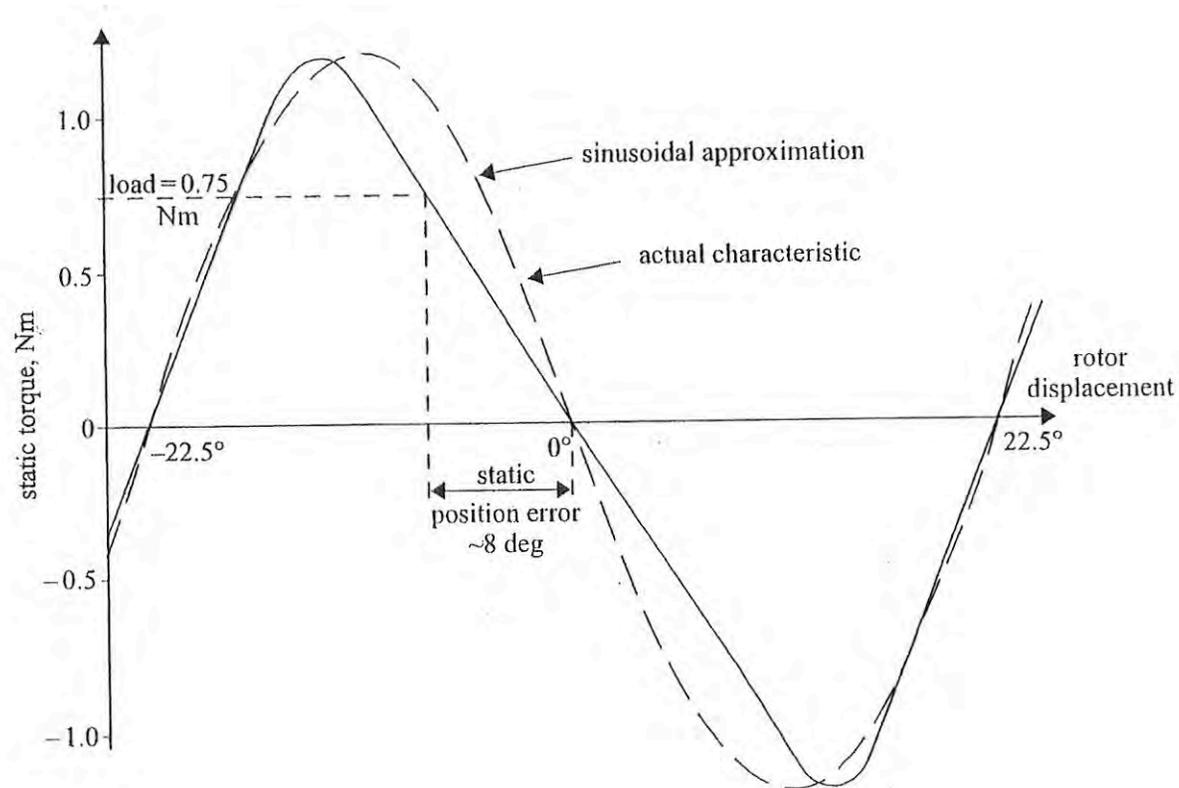
A-Método de la aproximación sinusoidal.

Si el par pico producido por un motor de pasos de p dientes en el rotor, operando a la corriente nominal es T_{pk} , en la aproximación sinusoidal se considera:

$$T = -T_{pk} \text{sen} p\theta$$

Si se aplica un par de carga T_l , que cumpla con:

$$T_l < T_{pk}$$



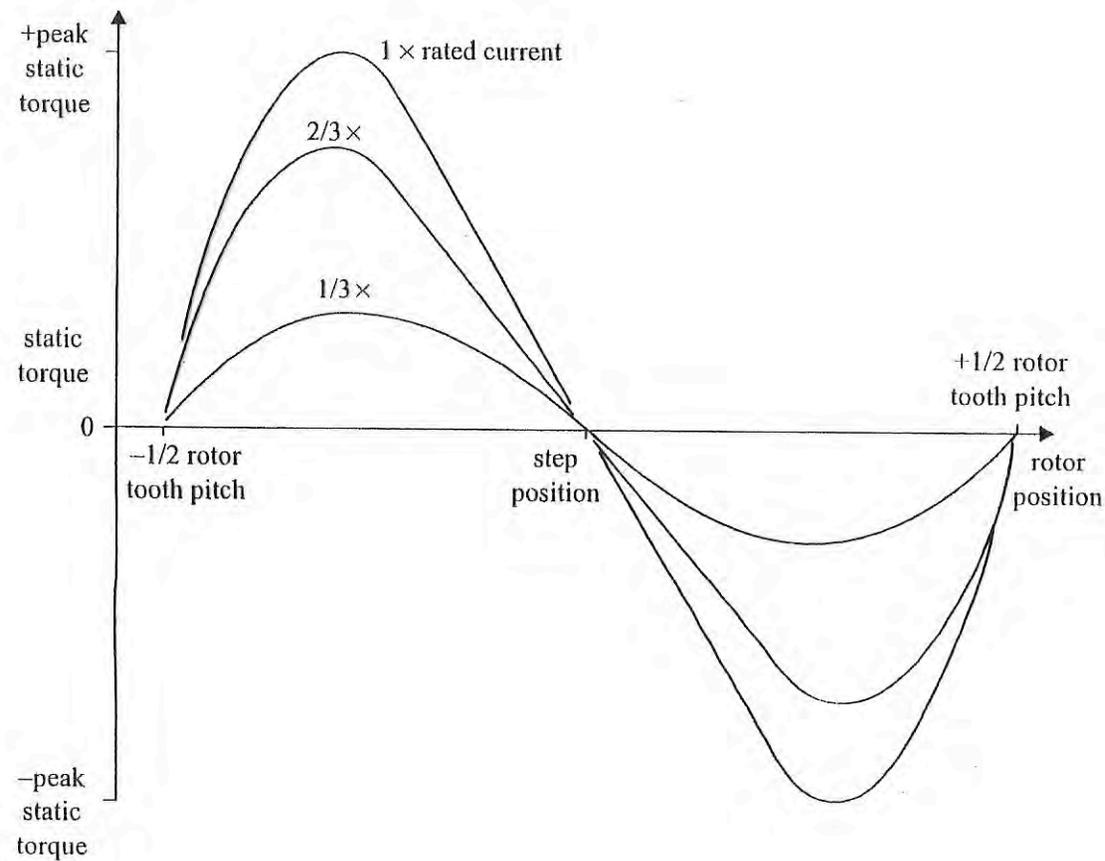
Par de un motor de pasos en función de la desviación respecto a la posición de equilibrio, aproximación sinusoidal.

El sistema se equilibrará cuando el par generado por el desplazamiento angular del rotor equilibre al par de carga, de acuerdo con:

$$T_l = -T_{pk} \text{sen} p \theta_e$$

Y el tamaño del error de posición respecto al punto de equilibrio del paso, θ_e , está dado por:

$$\theta_e = \frac{\text{sen}^{-1}\left(\frac{-T_l}{T_{pk}}\right)}{p}$$



Par de un motor de pasos en función de la desviación respecto a la posición de equilibrio, aproximación sinusoidal, con corriente de excitación variable.

Error de posición debido al par de carga.

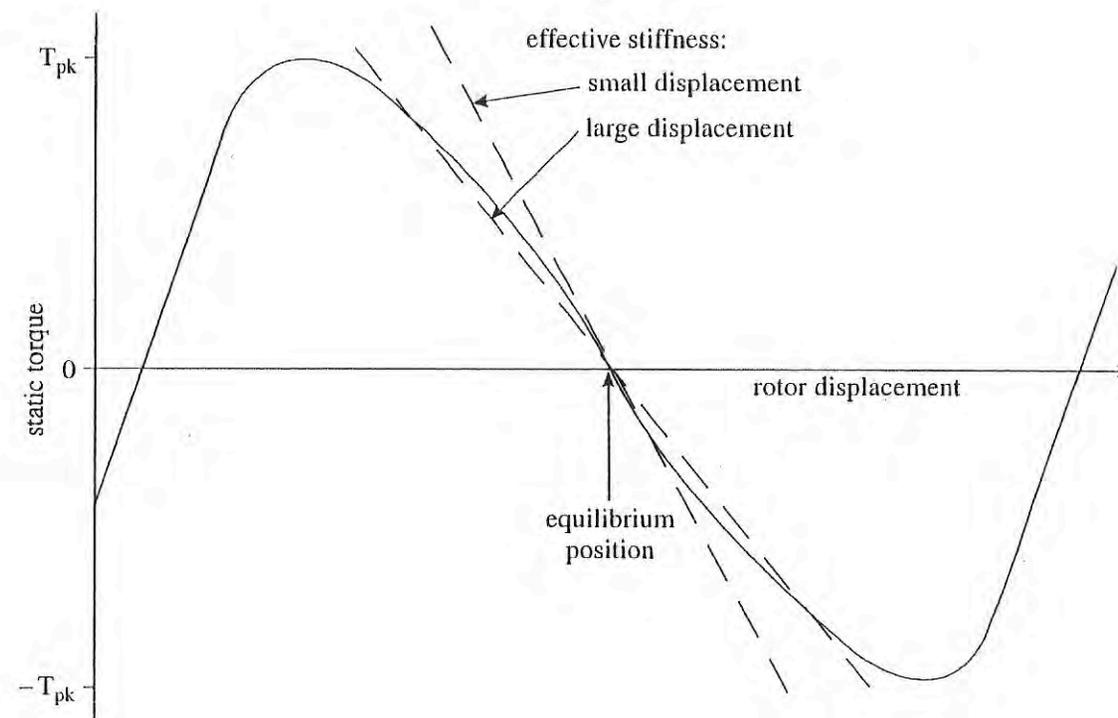
B-Método de la aproximación lineal, o método de la “rigidez”.

Si se define como “rigidez” del motor la pendiente T de la característica par estático generado/posición del rotor de un motor de pasos cuyo par pico es T_{pk} , el par generado por desplazamientos “pequeños” alrededor de la posición de equilibrio se puede aproximar como:

$$T = -T'\theta$$

Si se aplica un par de carga T_l , que cumpla con:

$$T_l < T_{pk}$$



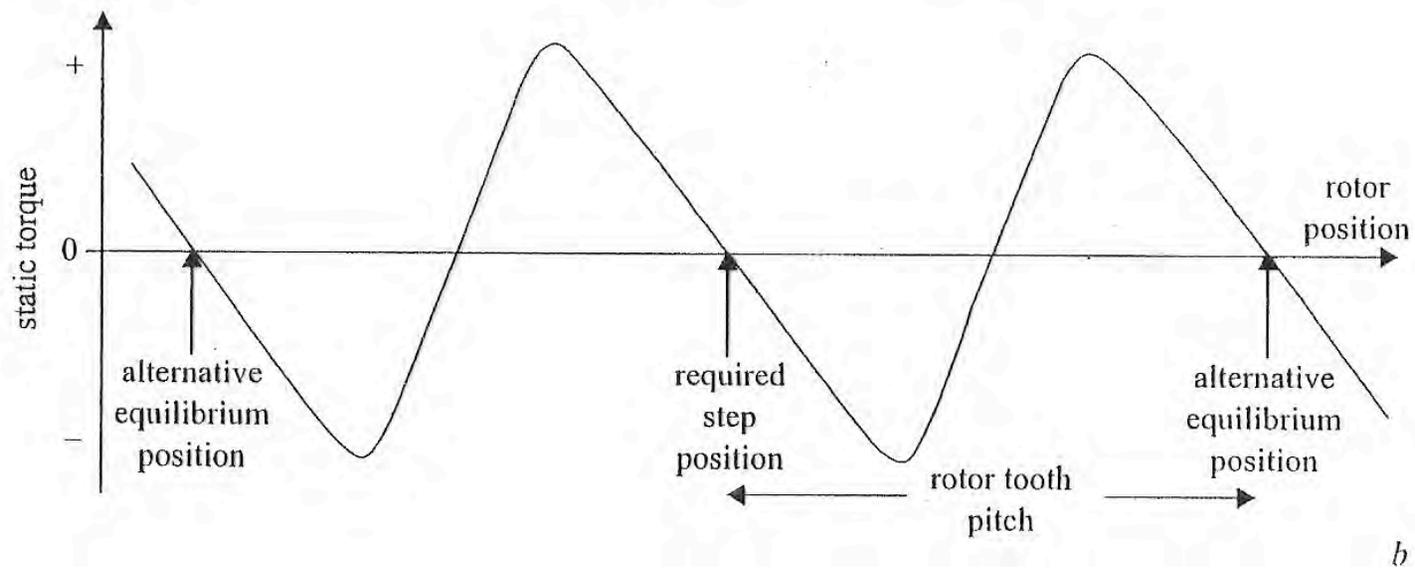
Par de un motor de pasos en función de la desviación respecto a la posición de equilibrio, aproximación lineal.

El sistema se equilibrará cuando el par generado por el desplazamiento angular del rotor equilibre al par de carga, de acuerdo con:

$$T_l = -T'\theta_e$$

Y el tamaño del error de posición respecto al punto de equilibrio del paso, θ_e , está dado por:

$$\theta_e = \frac{-T_l}{T'}$$



Posiciones de equilibrio, método lineal.

Excitación multifásica.

Las bobinas de los motores de pasos híbridos y de reluctancia variable están aisladas y cada una tiene un circuito de excitación independiente, por lo que es posible excitar dos o más fases simultáneamente

Los resultados de operar en excitación múltiple (energizando más de una fase para lograr un paso) dependen del número de fases y del tipo de motor.

I- Motores de reluctancia variable con tres bobinados independientes.

Empleando la aproximación sinusoidal para la función de par, y operando a corriente nominal para producir el par pico se tiene:

A-Excitación de una fase:

$$T_A = -T_{pk} \text{sen}(p\theta)$$

$$T_B = -T_{pk} \text{sen}\left(p\theta - \frac{2\pi}{3}\right)$$

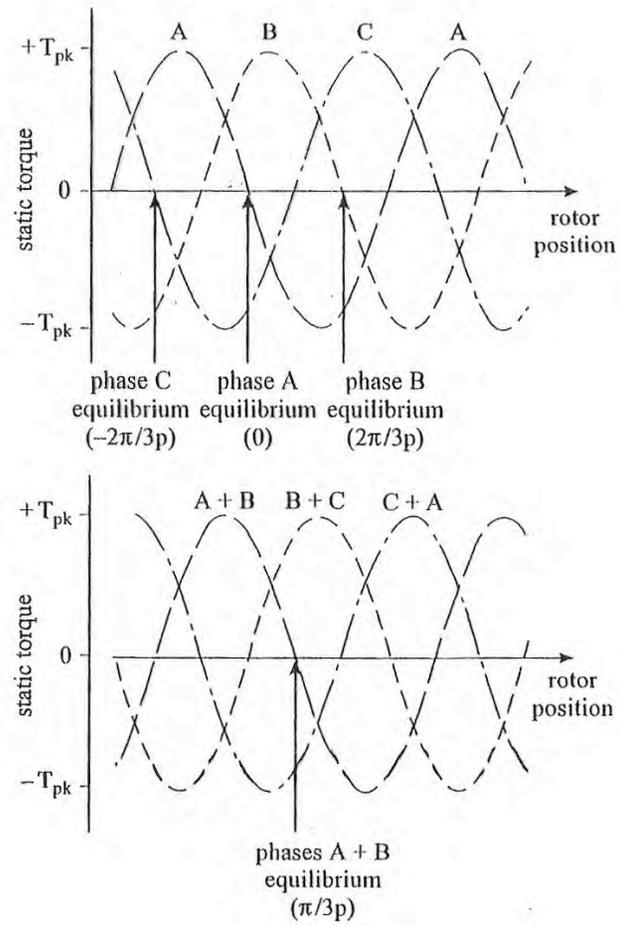
$$T_C = -T_{pk} \text{sen}\left(p\theta - \frac{4\pi}{3}\right)$$

B-Excitación de dos fases:

$$T_{AB} = T_A + T_B = -T_{pk} \text{sen}\left(p\theta - \frac{\pi}{3}\right)$$

$$T_{BC} = T_B + T_C = -T_{pk} \text{sen}(p\theta - \pi)$$

$$T_{CA} = T_C + T_A = -T_{pk} \text{sen}\left(p\theta - \frac{5\pi}{3}\right)$$



Posiciones de equilibrio en un motor de reluctancia de tres fases cuando se alimenta una fase (arriba) o dos fases (abajo).

Resultados:

1-Par pico producido: El valor pico del par producido no cambia al excitar dos fases simultáneamente

2-Posición de equilibrio (cero del par): Las tres nuevas posiciones de equilibrio quedan intercaladas simétricamente entre las posiciones de equilibrio operando con excitación simple

3-Si se usa una secuencia de excitación mixta (A, AB, B, BC, C, CA, A ...) el arco cubierto en cada pulso se reduce a la mitad, el número de pasos por vuelta se duplica y el par pico no queda afectado.

Esta forma de operación se llama “medios pasos” (“half-stepping”)

II- Motores de reluctancia variable con más de tres bobinados independientes.

En estos casos la operación con excitación múltiple no solo crea nuevos puntos de equilibrio, sino que en ciertas combinaciones de excitación, aumenta el par producido en el rotor. El caso debe analizarse para cada configuración, para determinar la estrategia óptima de excitación.

En el caso del motor con cinco bobinados se tiene la posibilidad de tres modos de operación diferentes significativos: excitación simple, doble y triple, que se analizarán para las fases A, B, y C.

1-Excitación simple:

$$T_A = -T_{pk} \text{sen}(p\theta)$$

$$T_B = -T_{pk} \text{sen}\left(p\theta - \frac{2\pi}{5}\right)$$

$$T_C = -T_{pk} \text{sen}\left(p\theta - \frac{4\pi}{5}\right)$$

2-Excitación doble:

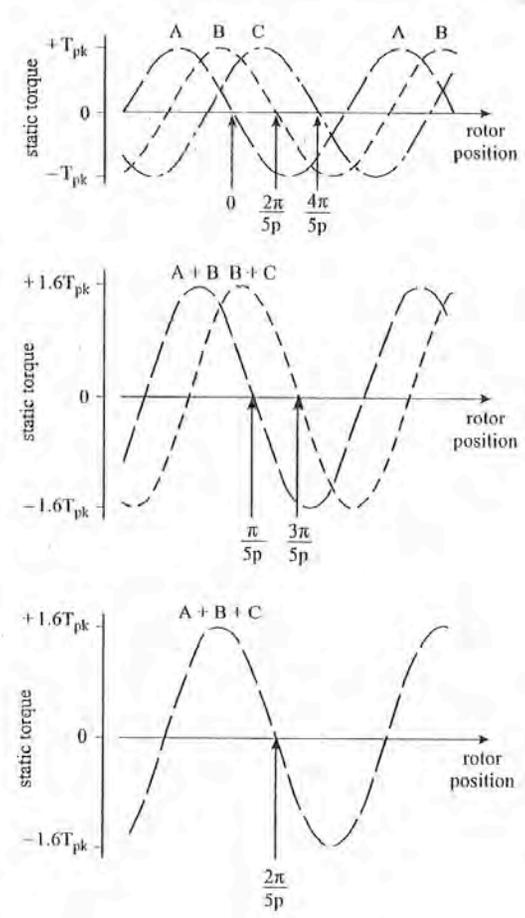
$$T_{AB} = T_A + T_B = -T_{pk} \text{sen}(p\theta) - T_{pk} \text{sen}\left(p\theta - \frac{2\pi}{5}\right)$$

$$T_{AB} = -1,6T_{pk} \text{sen}\left(p\theta - \frac{\pi}{5}\right)$$

3-Excitación triple:

$$T_{ABC} = T_A + T_B + T_C$$

$$T_{ABC} = -1,6T_{pk} \text{sen}\left(p\theta - \frac{2\pi}{5}\right)$$



Posiciones de equilibrio en un motor de reluctancia de cinco fases cuando se alimenta una fase (arriba), dos fases (centro) o tres fases (abajo).

Resultados:

- 1-El par pico aumenta en un 60% al operar en excitación múltiple
- 2-Es posible operar en el modo “half-step”.

Generalización a un número de fases elevado:

En una máquina de n fases, el par estático pico alcanza un máximo cuando el número de fases excitado es:

a- $(n/2)$ si n es par

b- $(n+1/2)$ o $(n-1/2)$ si n es impar

En el caso impar, es además posible operar en el modo “half-step” si se alterna el número de fases excitado entre $(n+1/2)$ y $(n-1/2)$

III-Motores de pasos híbridos.

En excitación simple:

$$T_{A+} = -T_{pk} \text{sen}(p\theta)$$

$$T_{A-} = -T_{pk} \text{sen}(p\theta - \pi)$$

$$T_{B+} = -T_{pk} \text{sen}\left(p\theta - \frac{\pi}{2}\right)$$

$$T_{B-} = -T_{pk} \text{sen}\left(p\theta - \frac{3\pi}{2}\right)$$

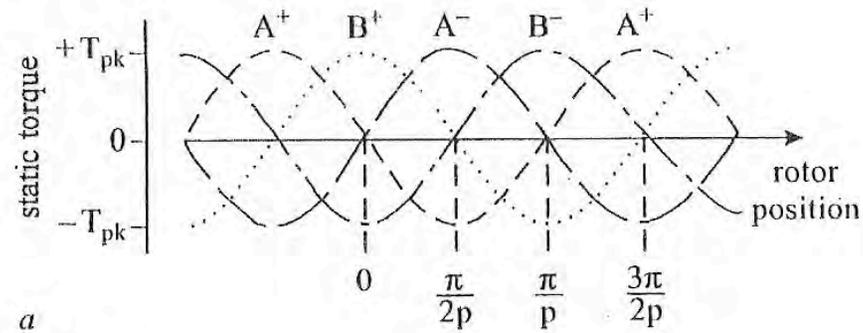
En excitación doble:

$$T_{A+B+} = T_{A+} + T_{B+} = -T_{pk} \text{sen}(p\theta) - T_{pk} \text{sen}(p\theta - \frac{\pi}{2})$$

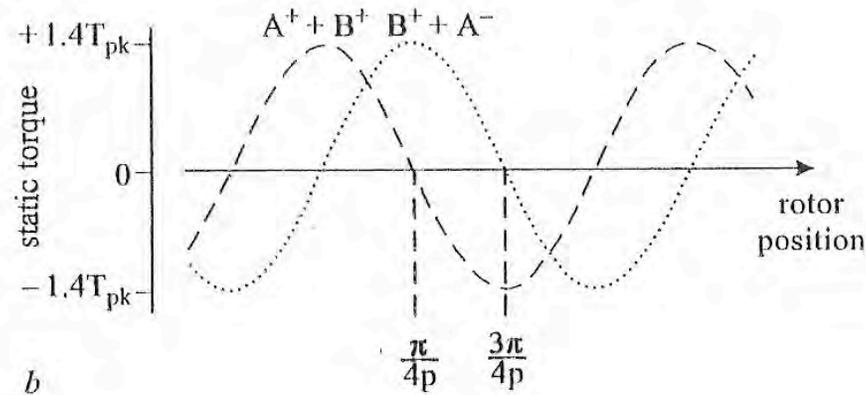
$$T_{A+B+} = -2T_{PK} \text{sen}(p\theta - \frac{\pi}{4}) \cos(\frac{\pi}{4})$$

$$T_{A+B+} = -1,4T_{PK} \text{sen}(p\theta - \frac{\pi}{4})$$

Es posible operar con un par aumentado en un 40%.



a



b

Posiciones de equilibrio en un motor híbrido cuando se alimenta una fase (arriba) o dos fases (abajo)

Nota final:

Debe tomarse en cuenta que al excitarse n fases, la potencia consumida en la fuente aumenta en un factor n con respecto a la potencia base consumida cuando se excita una sola fase.

Debe tomarse en cuenta también que el aumento en par nunca es igual a n veces el par base con una sola fase excitada.

Por lo tanto, la eficiencia energética disminuye significativamente cuando se opera en modo de excitación múltiple.

Actuadores de paso fraccionado (“Mini-step Drives”)

El par estático generado por un motor híbrido se puede escribir en función de la corriente de fase:

$$T_A = -k_T i_A \text{sen}(p\theta)$$

$$T_B = -k_T i_B \text{sen}\left(p\theta - \frac{\pi}{2}\right)$$

En los actuadores de “paso completo”, la corriente tiene idealmente solo dos valores, cero cuando la fase no está energizada, y el valor nominal durante todo el intervalo en el cual la fase debe estar energizada. Esto produce un paso de $\pi/2p$ por cada pulso de corriente.

Si se desea operar en el modo de “paso fraccionado”, el circuito de alimentación debe ser capaz de proporcionar una corriente cuyo valor se pueda ajustar entre 0 y el nominal en una serie de paso de amplitud calibrada.

Entonces, si:

$$i_A = I \cos a$$

$$i_B = I \cos\left(a - \frac{\pi}{2}\right)$$

Y se energizan ambas fases del motor con estos valores de corriente, el par generado será:

$$T = T_A + T_B = -k_T I \left[\text{sen}(p\theta) \cos a + \text{sen}\left(p\theta - \frac{\pi}{2}\right) \cos\left(a - \frac{\pi}{2}\right) \right]$$

$$T = -k_T I \text{sen}(p\theta - a)$$

Y la nueva posición de equilibrio es ahora:

$$\theta = \frac{a}{p}$$

Esto significa que con este control de corriente, el motor puede tomar cualquier posición intermedia entre las posiciones de “paso completo” definidas cuando se alimenta con la corriente nominal como:

$$\theta = 0, \frac{\pi}{2p}, \frac{\pi}{p}, \frac{3\pi}{2p}$$

En general, el tamaño, P_f , del paso fraccionado (mini-step) que se obtiene con un motor de paso completo “P” y un actuador capaz de entregar N niveles de corriente es:

$$P_f = \frac{P}{2N}$$

Operación en modo sostenido

De acuerdo con la relación entre la duración de los pulsos aplicados a las fases del motor y de la constante de tiempo de los circuitos del bobinado deben considerarse dos casos distintos:

a-Baja frecuencia de repetición: los pulsos son “largos” en relación con la constante de tiempo de subida de la corriente en las bobinas: la corriente puede aproximarse con un pulso cuadrado.

b-Alta frecuencia de repetición: los pulsos son “cortos” en relación con la constante de tiempo de la corriente en las bobinas: los pulsos no alcanzan su valor final.

Par de ruptura a baja frecuencia de repetición.

a-En excitación simple, el máximo par promedio, T_p , disponible en operación sostenida se puede calcular integrando la curva del par generado en función de la posición angular del rotor.

Empleando la aproximación sinusoidal se tiene:

$$T_p = \frac{\int_{-\frac{\pi}{6p}}^{\frac{\pi}{6p}} -T_{pk} \text{sen}(p\theta) d\theta}{\left(-\frac{\pi}{6p}\right) - \left(-\frac{5\pi}{6p}\right)} = 0,83T_{pk}$$

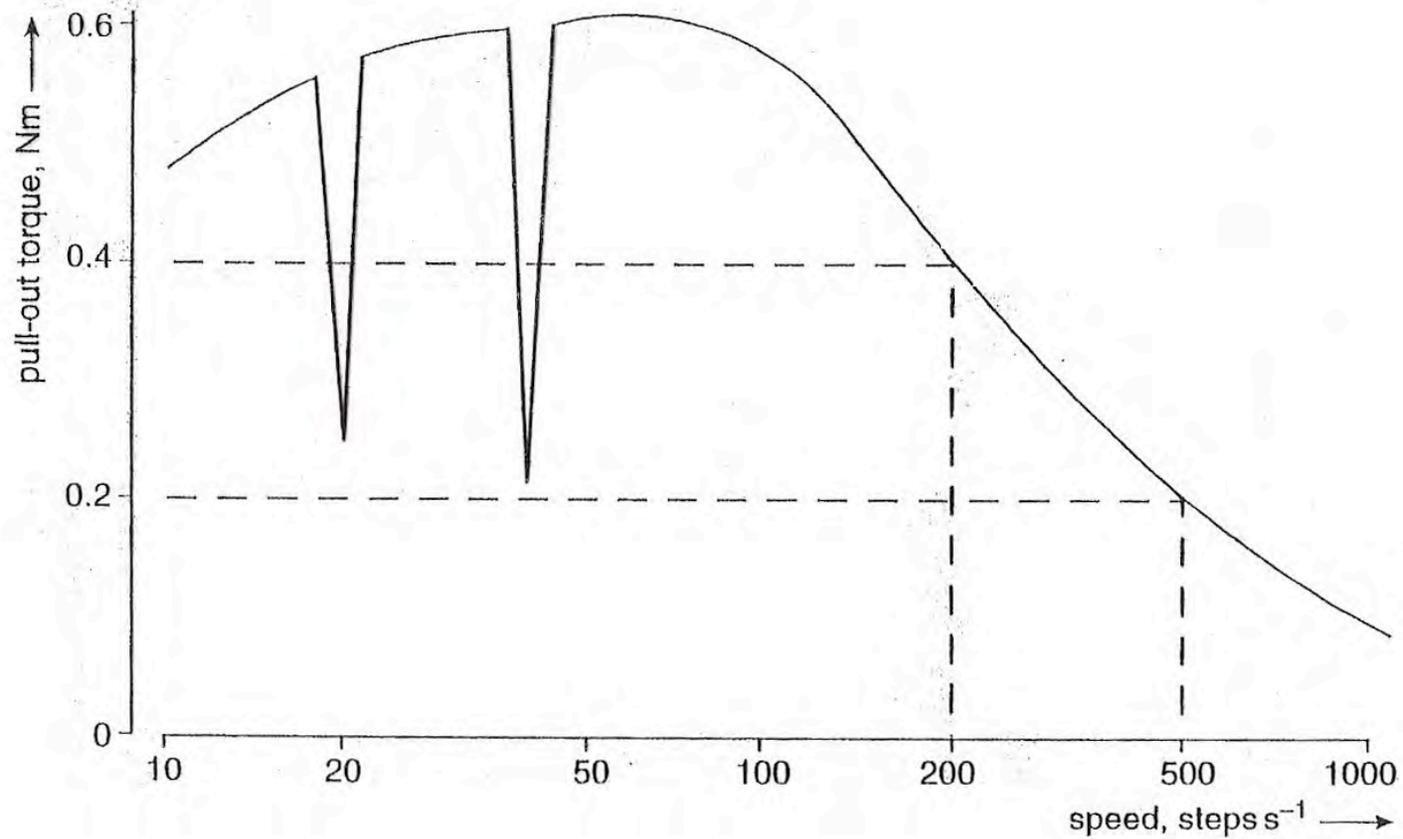
b-En excitación fraccionada (“half-stepping”) cada fase está alimentada durante la mitad del ciclo. Por lo tanto, empleando el mismo método, el aporte de cada fase resulta:

$$T_{pf} = \frac{\int_{-\frac{\pi}{p}}^0 -T_{pk} \operatorname{sen}(p\theta) d\theta}{\frac{2\pi}{p}} = \frac{T_{pk}}{\pi}$$

$$T_p = n \frac{T_{pk}}{\pi}$$

Nótese que este cálculo presupone que la inercia de la carga es “alta”, esto es lo suficientemente grande como para mantener el movimiento en la dirección de giro del motor durante los intervalos en los que el par instantáneo generado es menor que el par instantáneo requerido por la carga.

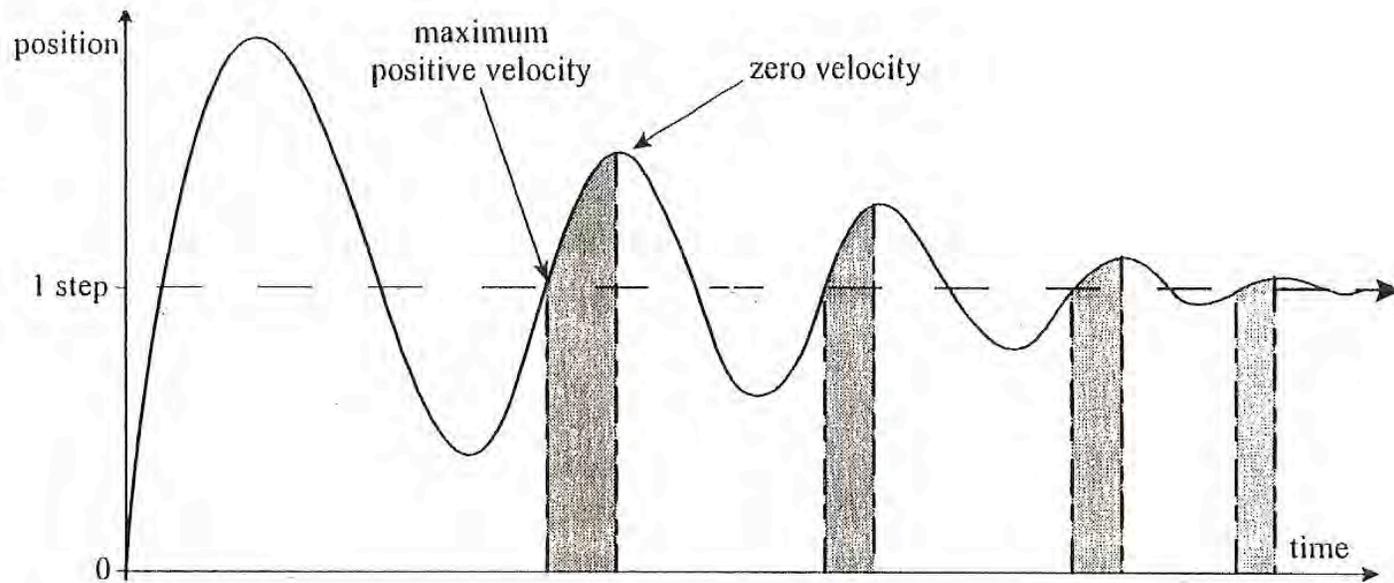
Esto implica que a medida que la frecuencia de repetición de los pulsos se reduce (baja la velocidad) el torque promedio aprovechable se reduce.



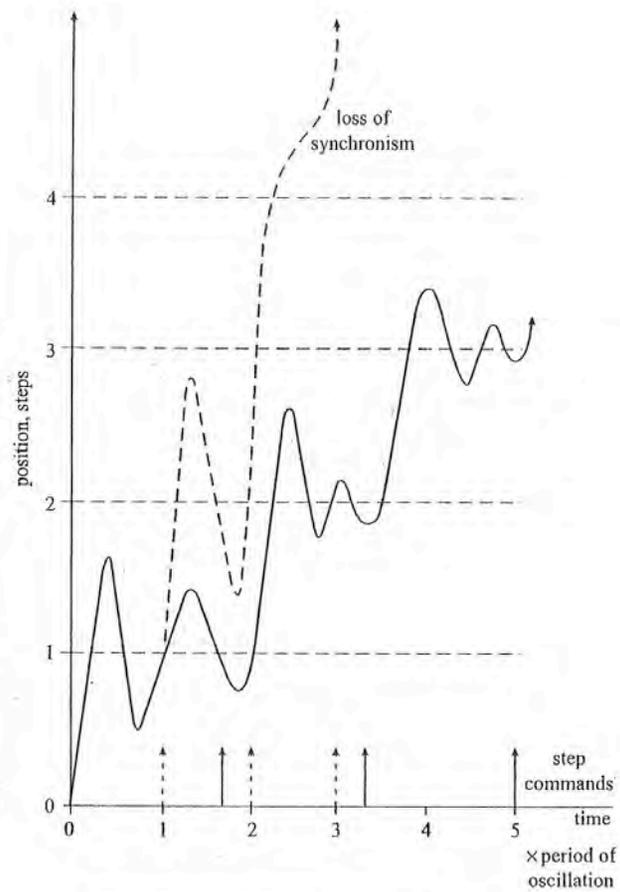
Par generado en función de la frecuencia de repetición de los pulsos.

Frecuencias prohibidas.

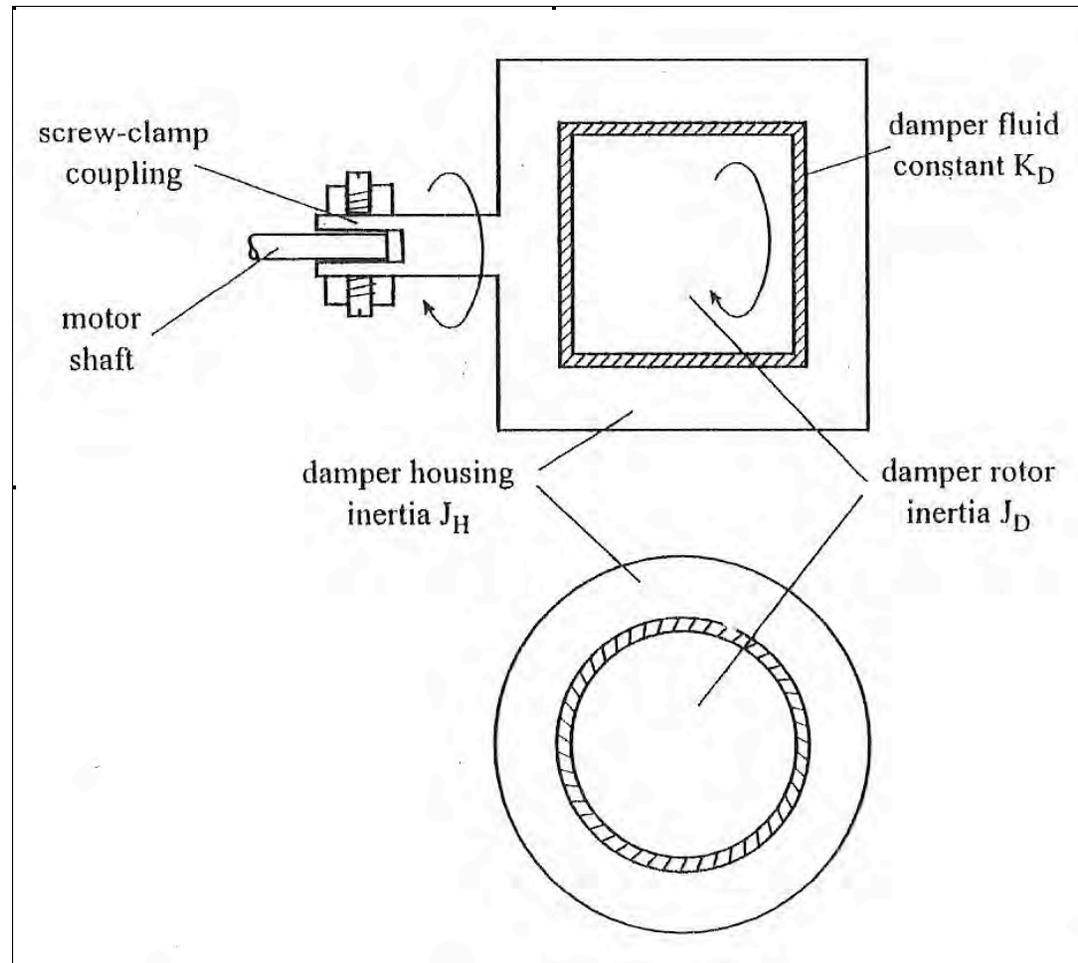
Son frecuencias de repetición en donde no resulta posible operar ya que los pulsos de par generado excitan oscilaciones mecánicas en el sistema motor-carga que llevan a la pérdida de control sobre la posición.



Respuesta sub-amortiguada a un cambio de un paso en la posición del sistema



Respuesta del sistema sub-amortiguado a una serie de pulsos.



Cortes esquemáticos de un mecanismo amortiguador de oscilaciones de posición en un eje.