

Capítulo 6

Motores paso a paso

1. INTRODUCCIÓN

Esta unidad comprende el funcionamiento del motor paso a paso, considerando también diferentes tipos: el motor paso a paso de imán permanente, que además del común, en este capítulo estudiamos otros tipos como el motor paso a paso de imán permanente «SLO-SYN» y el motor paso a paso de imán permanente en el estator; también vemos el motor paso a paso de reluctancia variable, su funcionamiento y la amortiguación necesaria; por último tratamos el motor paso a paso híbrido y su variante el nuevo motor paso a paso híbrido.

1.1 – Generalidades

En la actualidad, el resurgir de los motores paso a paso se debe a tres factores:

- Los servo-sistemas cada vez más complejos plantearon la necesidad de sistemas más confiables y baratos.
- El avance de las computadoras digitales. Los servo-sistemas requerían interfaces analógico-digital que constituía un problema, fue por eso que se crearon motores paso a paso que se adaptan perfectamente a los sistemas digitales.
- El avance de la tecnología de los dispositivos de estado sólido (transistores), los cuales vinieron a sustituir los relés o escobillas usados hasta entonces para comandar los motores paso a paso.

1.2 – Definición del motor paso a paso

Al motor paso a paso lo podemos definir como un dispositivo electromagnético diseñado para convertir una serie de impulsos en discretos movimientos angulares (pasos), uno por cada uno de los impulsos. Estos motores poseen la habilidad de poder quedar enclavados en una posición o bien totalmente libres. Si una (o más) de sus bobinas está energizada, el motor estará enclavado en la posición correspondiente y por el contrario quedará completamente libre si no circula corriente por ninguna de sus bobinas. Los impulsos pueden ser de la misma o contraria polaridad, pueden ser aplicados a un mismo arrollamiento o de forma sucesiva a las diferentes bobinas, y no pueden ser aplicados bajo una frecuencia fijada.

Ventajas:

- Apto para un giro continuo.
- Preciso y rápido posicionamiento de objetos a través de la electrónica.
- Movimiento controlado.
- Control posicional simple, confiable y preciso.

Desventajas:

- Debido a la complejidad del movimiento, la parte de comando, que hasta ese entonces consistía en simples llaves operadas manualmente, debió ser completada con componentes de electrónica. Es decir, a mayor precisión mayor complejidad en el sistema de control.

2. MOTOR PASO A PASO DE IMÁN PERMANENTE

Básicamente, estos motores están constituidos por un estator y un rotor. En el estator, están colocados devanados los cuales son energizados por corriente continua y en el rotor (que es el eje del motor), van puesto uno o varios imanes permanentes magnetizados para poder reaccionar al campo producido por los devanados del estator.

El rotor es el eje del motor, y está magnetizado a lo largo de uno de sus diámetros pudiendo tener uno o más pares de polos. Cuando se energiza las bobinas del estator, el campo magnético producido hace que el rotor se alinee con él. Energizando debidamente las bobinas del estator, se hace variar las tensiones en las bobinas del rotor y se hace girar así al rotor. La [Figura 2-1](#) muestra justamente este hecho y la [Tabla 2-1](#) muestra cómo tienen que ser las polaridades de las bobinas para que se produzcan los correspondientes pasos. En la [Tabla 2-1a](#), vemos la polarización que deben tener los devanados del estator para lograr pasos de 90° ; en la [Tabla 2-1b](#) vemos el caso para que los pasos estén «desfasados» 45° respecto al caso anterior, aquí el uso de energía aumenta el doble, puesto que por cada paso son las cuatro bobinas las que tienen que estar energizadas, aunque el par aumenta solo un **45%**; por último en la [Tabla 2-1](#) se muestra la secuencia de energizado para lograr pasos de 45° , que es justamente la combinación de los casos anteriores.

La conmutación de polaridad la podemos efectuar fácilmente por medios mecánicos, pero si utilizamos dispositivos de estado sólido nos enfrentamos al problema de trabajar con dos polaridades. Para subsanar esto es que se emplean motores de fases múltiples, con una derivación central en cada bobinado. La amortiguación en estos motores rara vez es necesaria. Para desmagnetizar el rotor, podemos hacerlo aplicándole una excitación que supere el régimen nominal. Por último, decimos que en funcionamiento, los elementos que constituyen el imán permanente presentan un **par sostenido**; por el contrario, cuando los arrollamientos no están energizados, decimos que presentan un **par de retención**.

	a) Ángulo de fase de 90°				b) Ángulo de fase de 90°				c) Ángulo de fase de 45°			
	S_1	S_2	S_3	S_4	S_1	S_2	S_3	S_4	S_1	S_2	S_3	S_4
1	+	0	-	0	+	+	-	-	+	0	-	0
2	0	+	0	-	-	+	+	-	+	+	-	-
3	-	0	+	0	-	-	+	+	0	+	0	-
4	0	-	0	+	+	-	-	+	-	+	+	-
5									-	0	+	0
6									-	-	+	+
7									0	-	0	+
8									+	-	-	+

Tabla 2-1: Pasos en un motor paso a paso de imán permanente, a) y b) de 4 pasos y c) de 8 pasos.

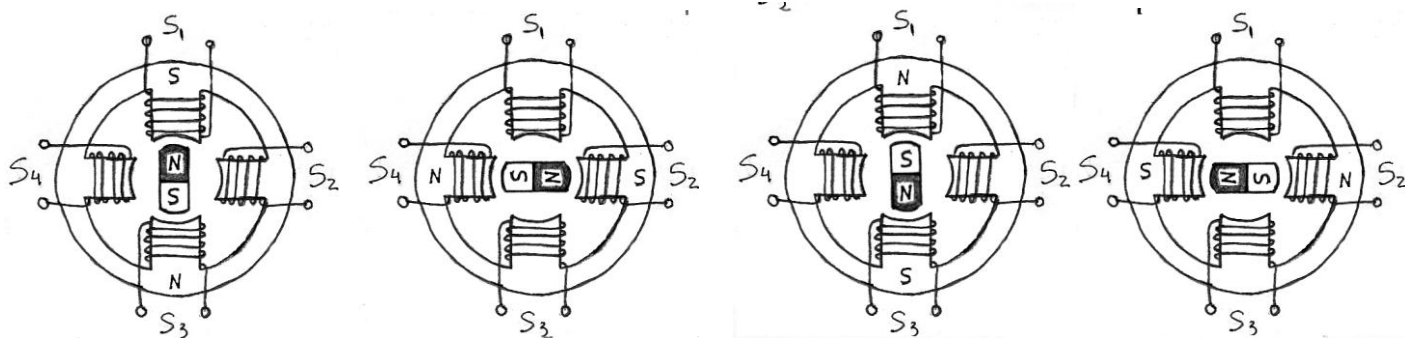


Figura 2-1: Motor paso a paso de imán permanente de 4 pasos.

2.1 – Características

2.1 – 1: Circuitos de excitación

La energía para la operación de un motor paso a paso, es suministrada por una fuente de corriente continua que, a través de dispositivos de conmutación, alterna el sentido de la corriente que llega a las bobinas de los estatores.

Básicamente los conmutadores pueden ser o mecánicos o electrónicos, las ventajas de éstos últimos respecto a los primeros se listan a continuación.

	Mecánica	Electrónica
Velocidad de conmutación	Baja	Alta
Desgaste de partes móviles	Requiere mantenimiento	No requiere mantenimiento
Vibración de contactos	"	"
Tiempos de conmutación	Altos	Bajos
Baja frecuencia	-	Capacidad de control

Con respecto a los tiempos de conmutación, explayándonos en el tema diremos que en la conmutación mecánica, al tratarse de una bobina, la corriente que circula por ésta no puede cambiar abruptamente de polaridad (Teoría de circuitos 1); en cambio en la conmutación electrónica, al tratarse de dispositivos de estado sólido, la corriente puede cambiar de polaridad casi instantáneamente, logrando así tiempos de conmutación mucho más cortos.

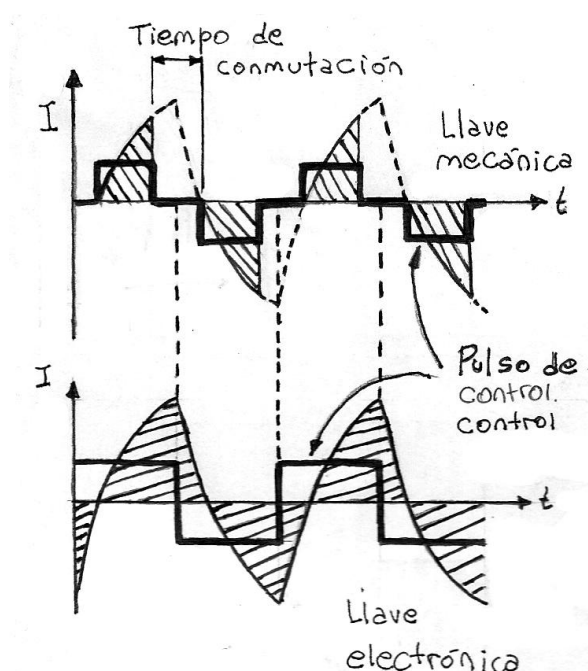


Figura 2-2: Tiempos de conmutación en una llave mecánica y en una electrónica.

Por último, la corriente en las bobinas de los estatores puede invertirse de manera bipolar o unipolar. En el primer caso, las bobinas de los estatores poseen una derivación central, la cual se conecta a un borne de la fuente de continua, en cuanto al otro extremo se conecta, conmutador de por medio, al otro borne de la fuente, y el sentido de la corriente depende de a qué borne se conectó este último extremo. En el caso de la inversión unipolar, al carecer de esta derivación, la corriente se invierte en toda la bobina.

2.1 – 2: Consideraciones sobre la aplicación en circuitos

En este tipo de motores hay que tener en cuenta la inestabilidad del mismo. Tenemos que tener en cuenta los siguientes problemas:

- **Resonancia:** Provocada por un sistema elástico conformado por el momento de inercia del motor, su carga y la rigidez magnética. Para minimizar su efecto podemos aplicarle al eje propulsor del motor la cantidad correcta de fricción.
- **Penduleo:** Para atenuarlo, podemos usar un amortiguador Lancanter. Se trata de un disco que se adhiere al eje por fricción y sigue la velocidad de rotación del mismo. Cuando el penduleo aparece, el disco gira un pequeño ángulo respecto del eje para absorber la variación de velocidad.
- **Problemas que aparecen en altas velocidades:** El apunte no dice nada sobre qué problemas específicamente se presentan cuando trabajamos a altas velocidades. Se limita a decir que debemos tener en cuenta, sobre todo cuando la precisión angular es crítica, la velocidad de arranque y de parada y las características de amortiguamiento.

2.1 – 3: Alimentación

Con alimentación nos referimos al tren de pulsos que utilizamos para controlar el motor. Básicamente podemos usar cualquier circuito que genere dos señales de onda cuadrada con polaridad positiva y negativa –por ejemplo un biestable (flip-flop)–, con un ciclo de trabajo del 50% y con una diferencia de fase entre ellas de 90°.

2.1 – 4: Ángulo de paso

El ángulo de paso es el menor ángulo al que puede girar el rotor. Los motores del mercado por lo general poseen ángulo de paso desde 0,72 hasta 90°. Los motores de la North American Philips Control Corporation tienen como estándares los siguientes ángulos: 7,5, 15 y 18°, con 48, 24 y 20 pasos por revolución respectivamente. Podemos usar estos pasos para conformar –circuitaría electrónica de por medio– ángulos de pasos más grandes, por ejemplo 4 pasos de 15° conforman uno de 90°.

2.1 – 5: Precisión

La precisión –aunque el término correcto sería exactitud (o error)– de cada paso es de $\pm 6,5\%$ **no acumulativa**.

En el libro da una explicación de por qué la precisión aumenta (o el error disminuye) si trabajamos con un número de pasos múltiplo de dos o de cuatro, y dice que cada 4 pasos eléctricos (lo que equivalen a un paso polar) el error se anula, pero no entiendo esta afirmación. Se supone que la exactitud en una determinada posición viene dada por la exactitud que tiene la bobina al mantener al rotor en dicha posición. Esta posición no tiene, dentro de ciertos límites, memoria, ya que un polo del estator que se energice producirá el giro correspondiente del rotor independientemente de la exactitud que tuviere en el paso anterior.

2.2 – Otros tipos de motor paso a paso de imán permanente

2.2 – 1: Motor «SLO-SYN»

SLO-SYN es una marca registrada y sus motores son por lo general como lo muestra la [Figura 2-3a](#), en donde tenemos 8 (o 4 pares de) polos en el estator, en el que usamos los números 1, 2, 3 y 4 para referirnos a cada polo; y 8 dientes en el rotor, cada uno denotado con las letras que van de la A hasta la J. En realidad, los polos del estator son llamados también dientes y lo mismo sucede con los dientes del rotor, que se denominan también polos, pero usaremos la palabra polos para referirnos al del estator y dientes para los del rotor.

La [Figura 2-3b, c, d y e](#) explica el funcionamiento. El rotor y todos sus dientes están polarizados mediante un disco de alnico como «sur» o «negativo». Aplicamos una señal de tensión a las bobinas del estator y veremos qué es lo que sucede en cada etapa del ciclo de esta señal.

- **Al comienzo del ciclo:** el polo 1 está polarizado como positivo, el 3 como negativo y los polos 2 y 4 no están energizados. En esta condición, el rotor permanece en la posición de la [Figura 2-3a](#). El diente A(+) y el polo 1(-) se atraen, los dientes C(-) y D(-) se ven repelidos con la misma fuerza por el polo 3(-), ya que ambos dientes están a la misma distancia de 3.
- **A $\frac{1}{4}$ de ciclo:** en este instante del ciclo energizamos los polos 2 (como positivo) y 4 (como negativo) mientras que los polos 1 y 3 permanecen sin energía. Aquí el diente B(-) y el polo 2(+) se atraen y el rotor se mueve en sentido horario hasta que B y 2 se alinean, en tanto que C queda a 9° de 3. Es decir, que el rotor se mueve 9° en sentido horario respecto a la posición inicial. El rotor queda como en la [Figura 2-3b](#).

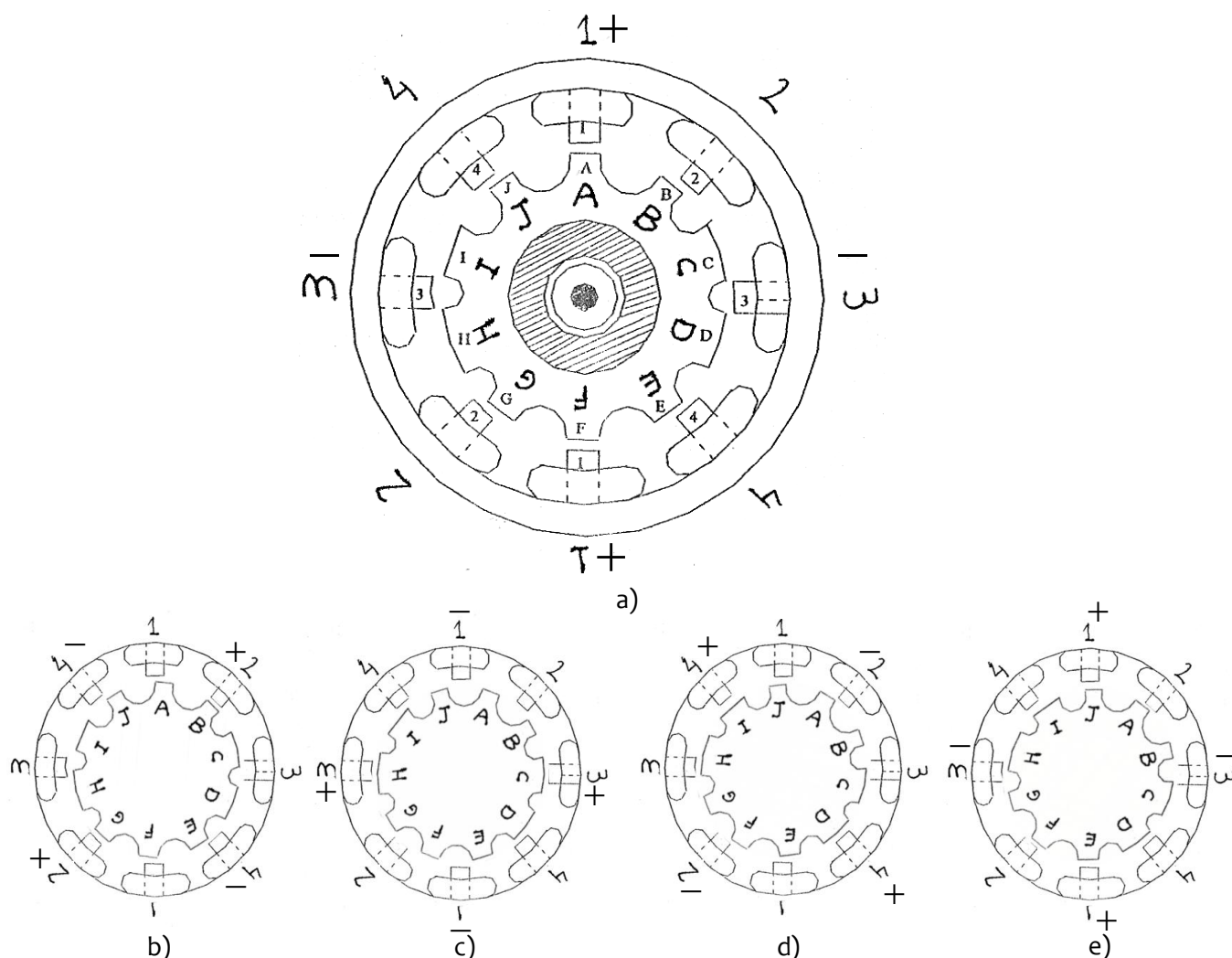


Figura 2-3: Esquema de un motor paso a paso de imán permanente «SLO-SYN», **a)** esquema de polos y dientes, **b)** esquema simplificado después de $\frac{1}{4}$ de ciclo (de la señal que se aplica a las tensiones de los polos), **c)** pasado $\frac{1}{2}$ de ciclo, **d)** pasado $\frac{3}{4}$ de ciclo y **e)** pasado un ciclo completo.

- **A $\frac{1}{2}$ de ciclo:** aquí energizamos los polos 3 (como positivo) y 1 (como negativo) mientras que los restantes (2 y 4) permanecen sin energía. En esta condición, C(+) y 3(-), que en la posición anterior estaban a 9° , se atraen hasta alinearse produciendo el giro del rotor de 9° justamente en sentido horario, quedando a 18° desde la posición inicial, tal como lo muestra la [Figura 2-3c](#).
- **A $\frac{3}{4}$ de ciclo:** el polo 4 se energiza como positivo y el 2 como negativo, los polos 1 y 3 están sin energía. De esta forma, como sucede en los anteriores casos, el rotor gira otros 9° en sentido horario, sumando así 27° en total desde la posición inicial quedando D y 4 alineados. La [Figura 2-3d](#) muestra como queda el rotor en esta posición.
- **En 1 ciclo:** después de esto, se repite el ciclo y los polos se vuelven a energizar como en la posición inicial, aquí el rotor gira otros 9° llegando a un total de 36° desde la posición inicial. Es decir, que cuando la señal aplicada a las bobinas de los polos completa un ciclo (360° eléctricos), el rotor gira 36° (grados geométricos) desde la posición inicial en sentido horario, entonces E y 4 quedan alineados. Decimos entonces que giró un paso polar, pero este paso polar se refiere a los pasos (dientes) del rotor y no del estator.

Como las bobinas del estator son bifásicas, lo mismo sucede con los dientes. La siguiente tabla muestra qué polos se energizan y los grados en cada ciclo de la señal de entrada.

Polos				Grados eléctricos	Grados geométricos	Alineados
1	2	3	4			
+	0	-	0	0°	0°	1 con A y F
0	+	0	-	90°	9°	2 con B y G
0	-	+	0	180°	18°	3 con C y H
0	0	-	-	270°	27°	4 con D e I
+	0	-	0	360°	36°	1 con E y J

Tabla 2-2: Pasos de un motor paso a paso de imán permanente «SLO-SYN».

2.2 – 2: Motor con dos estatores

Existe una versión de este tipo de motor paso a paso que consta de 2 estatores, cada uno posee 12 pares de polos, el esquema de este motor lo vemos en la [Figura 2-4](#). Los polos de ambos estatores están alternados entre sí una distancia de medio paso polar. Cada estator, a su vez, tiene una bobina que puede ser accionada a través de un simple conmutador para dejar pasar una tensión continua en una u otra dirección. Si bien el principio de funcionamiento es parecido al del motor anterior, no está claro en el apunte de Ubal cómo se realiza el giro del rotor, ni cuáles son los pasos del mismo; falta describir, en última instancia, cada una de las combinaciones de tensión que le podemos aplicar a las bobinas de los estatores. Sólo nos dice que cambiamos la polaridad de los estatores en forma alternada.

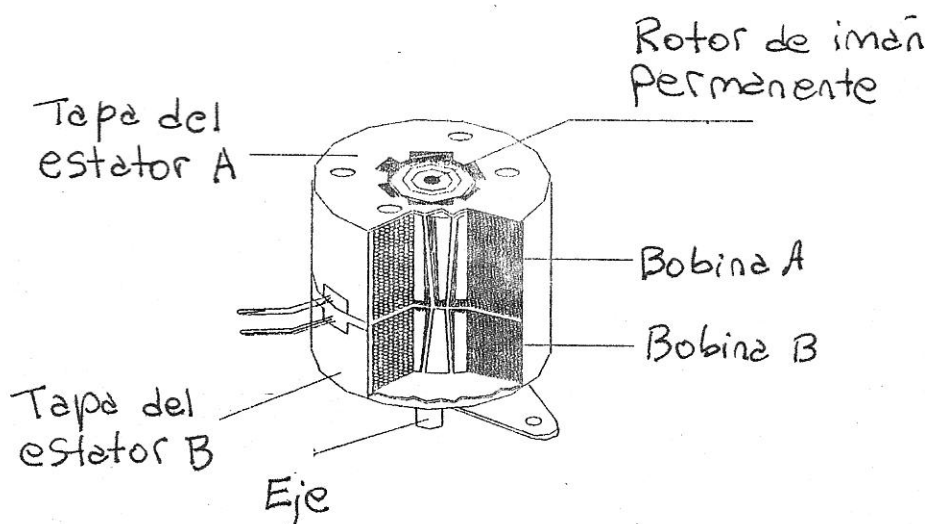


Figura 2-4: Motor paso a paso de imán permanente con dos estatores.

La conmutación se realiza mediante un conmutador electrónico (multivibrador biestable) y un circuito de puerta para controlar la secuencia de conmutación. Este tipo de conmutador (electrónico) permite ampliar el campo de acción de los motores paso a paso ya que permite el uso de distintos tipos de transductores y una elevada frecuencia.

La posición inicial la vemos en la Figura 2-5a, donde la fuente de tensión continua alimenta a los dos estatores. En este estado, se producen en éstos últimos, polos «norte» y «sur» que atraen a los polos del rotor como en la figura a. En la Figura 2-5b, el conmutador **SW1** cambia de la posición B a la posición A, esto alterna los polos del estator «superior» y produce una atracción de los polos del rotor como vemos en la misma figura. Esto hace que el rotor gire se mueva hacia la «derecha» una distancia **d** igual a la mitad de la distancia del paso polar.

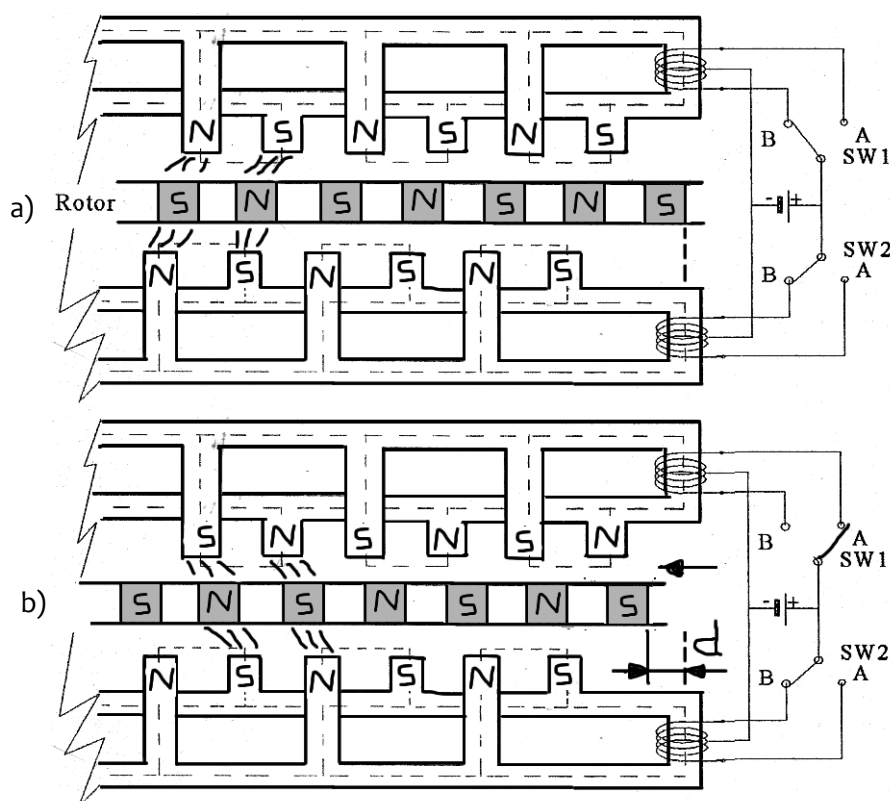


Figura 2-5: Conmutación en un motor paso a paso de imán permanente con dos estatores.

2.2 – 3: Motor paso a paso de imán permanente en el estator

Este es uno de los temas que más me costó estudiar porque en el libro de Ubal los gráficos no están bien hechos y por internet no pude encontrar nada. Así que el siguiente desarrollo puede contener errores. Recomiendo estudiar el tema del libro de Ubal y preguntarle bien cómo funciona este tipo de motor, ya que suele salir en los finales.

En la Figura 2-6a podemos ver el esquema de este motor. En el estator, y encastrados, hay dos imanes permanentes en forma J conformador por alnico V;¹ esto garantiza exactitud en el posicionamiento a altas velocidades y libera al motor de las limitaciones provocadas por el par resistente inducido. Los imanes están puestos en paralelo para mejorar la distribución de flujo. El rotor es una pieza fresada con extrema precisión y centrada con mucha exactitud; está hecha de acero y posee un gran número de dientes (10 en el caso de la Figura 2-6a). Está montado en un eje de acero pulido y rígido soportado por dos cojinetes a rodillos de precisión. En la Figura 2-6a, C es el polo de retención y A y B son polos de excitación de hierro-níquel. Los imanes permanentes abrazan tanto A como a B y C.

¹ El alnico V (o alnico 5) es un tipo de alnico que es anisótropo, es decir, tienen una dirección preferida de magnetización o de orientación.

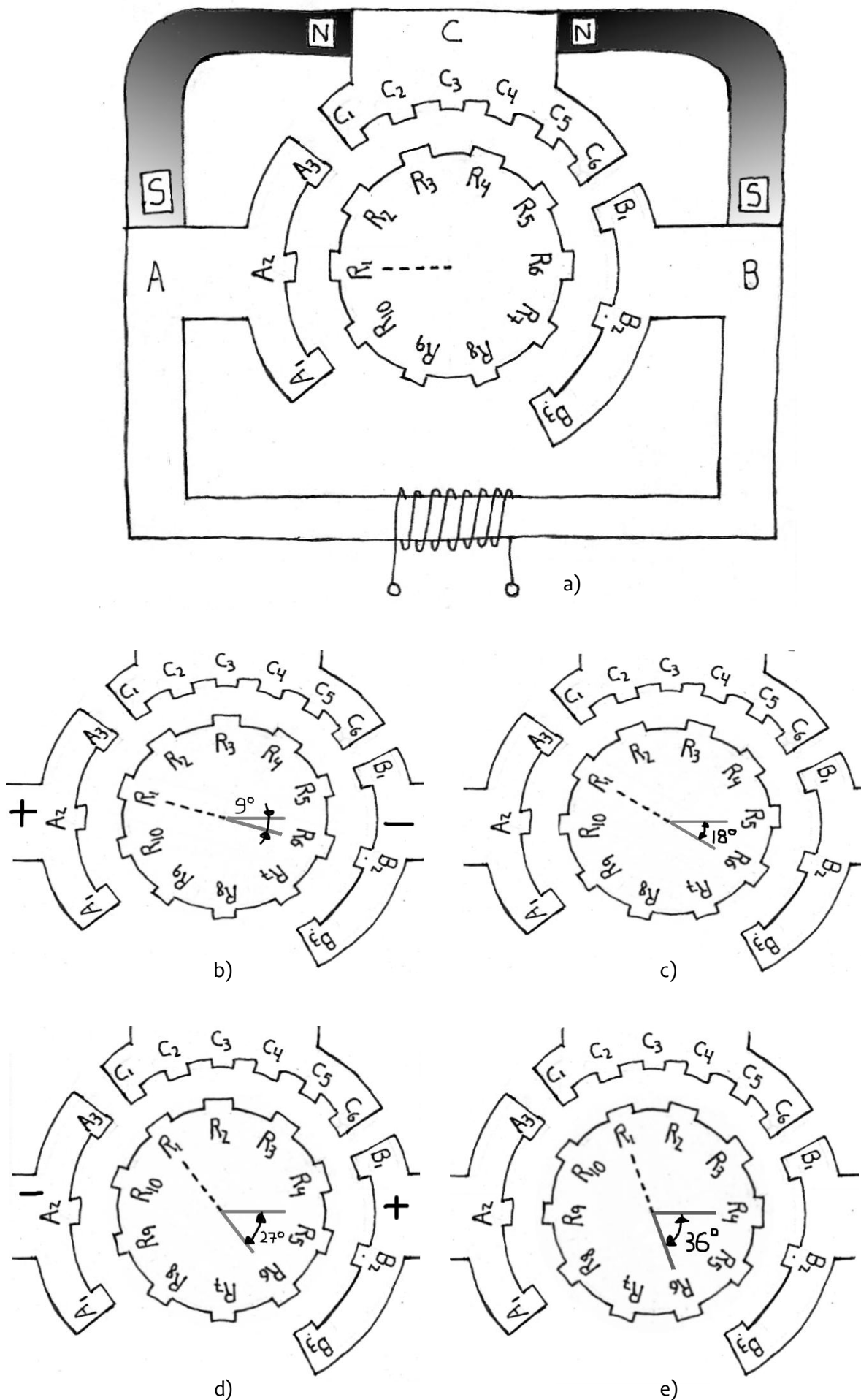


Figura 2-6: Esquema de un motor paso a paso de imán permanente en el estator, a) posición inicial, b), c), d) y e) diferentes posiciones que toma el rotor durante el ciclo.

En la [Figura 2-6a](#) podemos ver la posición inicial del motor. Cada polo de excitación tiene tres dientes separados entre sí 36° y el rotor tiene 10 dientes como ya dijimos, separados también a 36° ($360/10=36$). Los polos están colocados de forma tal que, al estar alineados los tres dientes de A con tres dientes del rotor, los dientes de B se alinean con los espacios que hay entre los dientes rotóricos.

- **Posición inicial:** en la posición inicial, el rotor está asegurado entre la parte B y la C; es decir, están alineados los dientes A_1 con R_{10} , A_2 con R_1 , A_3 con R_2 , C_2 con R_4 y C_4 con R_6 .
- **$1/4$ de ciclo:** cuando aplicamos corriente positiva a la bobina, se energiza B como positivo y C como negativo ([Figura 2-6b](#)). Esto obliga al flujo a cerrarse a través de A y el rotor gira 9° en sentido horario y asegurado por los dientes C_1 , C_3 y C_5 del polo de retención.
- **$1/2$ de ciclo:** cuando interrumpimos la corriente de la bobina, el flujo proveniente de C_1 , C_3 y C_5 gire el motor otros 9° . El rotor giró en total 18° ([Figura 2-6c](#)).
- **$3/4$ de ciclo:** cuando energizamos la bobina pero en sentido contrario, el flujo se ve obligado a cerrarse por B. El rotor gira otros 9° y queda como en la posición de la [Figura 2-6d](#).
- **Ciclo completo:** cuando sacamos la energía de la bobina, se produce el mismo fenómeno que en el $1/2$ de ciclo, y el rotor queda posicionado como en la [Figura 2-6e](#).

3. MOTOR PASO A PASO DE RELUCTANCIA VARIABLE

En esencia este tipo de motor paso a paso es similar al del imán permanente, la diferencia es que mientras en el primero el rotor es un imán permanente (con polaridad positiva y negativa) aquí está compuesto de un material magnético de hierro dulce con una sola polaridad (por lo general negativa). Se pueden conseguir pasos muy pequeños.

En todo momento, el rotor «buscará» alinearse de forma tal de minimizar la reluctancia rotor-estator, circunstancia que se da cuando el espacio entre polos del estator queda lo más posiblemente ocupado por material del rotor.

Este tipo de motor puede diseñarse para funcionar con pasos más pequeños que los pasos de un motor paso a paso de imán permanente. Su rotor es de baja inercia, esto tiene la ventaja de mejorar su respuesta dinámica, pero la desventaja de tener menor par motor que un motor eléctrico de imán permanente de similar tamaño.

3.1 – Principio de funcionamiento

El esquema de este tipo de motor es el de la [Figura 3-1](#). El rotor es de hierro dulce, posee –en el caso de la figura– cuatro polos y se energiza de tal forma que queda formado un «sur»; en el estator hay 3 bobinas dispuestas a 120° entre sí a lo largo de la circunferencia.

El funcionamiento se produce energizando las bobinas A, B y C del estator:

- **Energizado de la bobina A:** en este estado, la bobina A y el polo 1 se encuentran alineados ya que se atraen.
- **Energizado de la bobina B:** en este estado, y cuando cesa la energía de A, la bobina B atrae al polo 2 y el rotor gira 30° en sentido horario, ya que este es el ángulo que los separaba en la posición anterior. Aunque entre 3 y B hay atracción también, la existente entre 2 y B es mayor porque hay menos distancia (angular) que entre 3 y B, de esta forma el sentido de giro queda garantizado. Hay que aclarar que debemos energizar B antes de sacarle la energía a A. Si no lo hacemos así, el rotor queda a merced de cualquier fuerza externa, por ejemplo la de la carga, que puede producir una torsión y hacer que el rotor gire en sentido anti horario lo suficiente (basta con 16°) produciendo así que 3 y B estén a menos distancia que 2 y B. Esto ocasionaría un mal funcionamiento.

- **Energizado de la bobina C:** cuando energizamos C –sin dejar sin energía a B– se produce el mismo efecto anterior: 3 y C se atraen y el rotor gira otros 30° .

Por cada pulso de corriente el rotor gira 30° geométricos, lo cual implica la necesidad de 12 pulsos para que el rotor de un giro completo (360°). Si la secuencia de impulsos es ahora A-C-B-A el motor girará en sentido contrario.

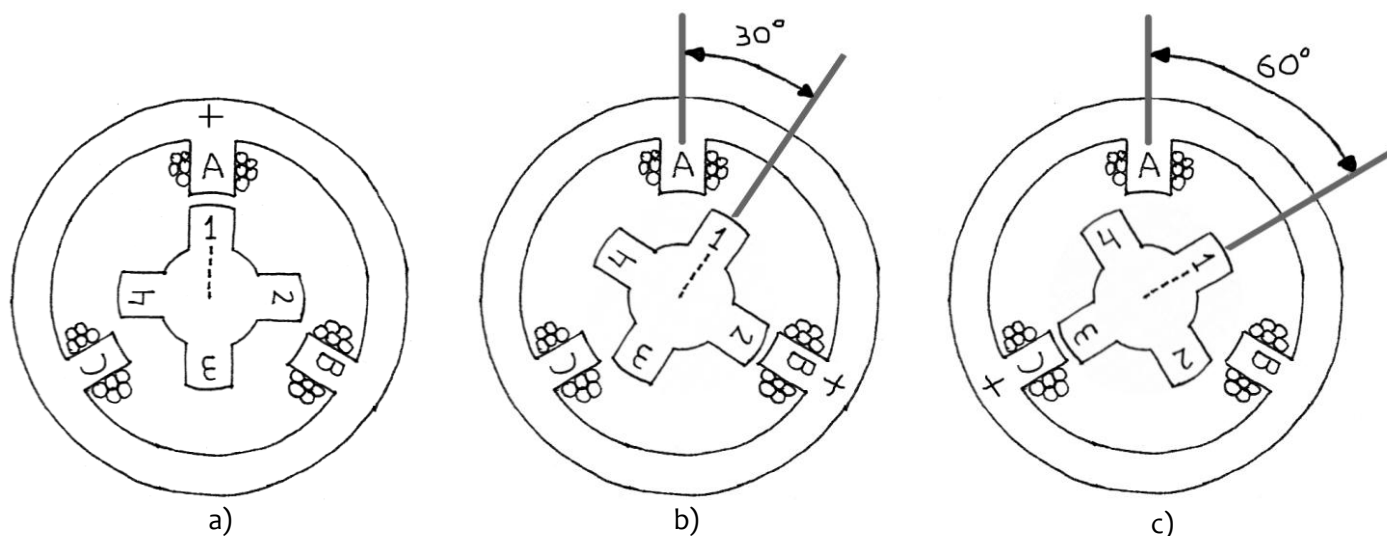


Figura 3-1: Motor paso a paso de imán permanente de reluctancia variable, a) bobina A energizada, b) bobina B energizada y c) bobina C energizada.

Versión con 8 polos

Cuando el rotor posee 8 polos en lugar de 4, dará un giro de 15° grados y necesitaremos 24 impulsos para dar la vuelta completa. Con la salvedad de que con la secuencia A-B-C-A ahora tenemos que el giro será en sentido anti horario.

3.2 – Amortiguación

Cuando el rotor no logra seguir a los pasos correspondientes a la entrada del sistema, decimos que el mismo ha entrado en **resonancia**. Para que esto no suceda, el ángulo de par no debe superar la mitad de un paso.

A fin de evitar la resonancia, empleamos diversos métodos de amortiguación en el motor. Estos métodos básicamente lo que hacen es proporcionar al rotor un *retropar*² para que éste no supere el ángulo de par del estator.

3.2 – 1: Amortiguación mediante embrague deslizante

Este método utiliza un *volante de inercia*³ colocado en los anillos. Logramos con esto añadir al rotor una resistencia al movimiento y por lo tanto una carga de fricción, esto provoca una disminución de la velocidad, por lo que reduce la posibilidad de que el rotor supere la velocidad del par del estator.

La precisión de la fricción se regula mediante un resorte. La desventaja de este método es justamente la precisión, pues ésta depende del desgaste del sistema, el cual va aumentando con el tiempo.

² Un **retropar** es un par que produce el efecto contrario al par al que hace referencia, en este caso el retropar produce que el rotor gire en sentido contrario para que disminuya su velocidad.

³ Un **volante de inercia** es un elemento totalmente pasivo, que únicamente aporta al sistema una inercia adicional de modo que le permite almacenar energía cinética. Este volante continúa su movimiento por inercia cuando cesa el par motor que lo propulsa. De esta forma, el volante de inercia se opone a las aceleraciones bruscas en un movimiento rotativo.

3.2 – 2: Amortiguación resistiva

Consiste en colocar a las bobinas del rotor resistencias, con esto podemos hacer circular la corriente nominal por una bobina y limitar la corriente por las demás. Estas bobinas (las que no conducen la corriente nominal) generan un retropar que actúa sobre el rotor limitando su velocidad. La desventaja de éste método es que aumenta el consumo de energía un 20%.

3.2 – 3: Amortiguación capacitiva

Consiste en colocar, en lugar de resistencias, condensadores en paralelo a las bobinas del estator. Cuando una fase se desenergiza y se energiza la siguiente, el condensador de la fase desenergizada comienza a descargarse lentamente haciendo circular una corriente por la bobina en sentido contrario, lo que ocasiona que se genere un retropar. El consumo de energía es menor que en el caso anterior pero lo que aumenta es el precio, ya que un condensador es más caro que una resistencia.

3.2 – 4: Amortiguación de retropar

Este método utiliza un sistema de control con dispositivos electrónicos para hacer circular por las bobinas del estator una energía –previamente almacenada– para provocar el retropar. Este método no consume energía⁴ ni afecta el rendimiento del sistema, la desventaja viene dada por la complejidad que el sistema de control requiere.

4. MOTOR PASO A PASO HÍBRIDO

Los motores híbridos son en principio iguales a los de reluctancia variable, con la diferencia que tienen un imán permanente en el rotor para «ayudar» a la excitación de las bobinas del estator, permitiendo mayor exactitud en el posicionamiento. También obtenemos con esta mezcla, ángulos de paso pequeños y alto par con un tamaño pequeño.

Específicamente, el rotor está formado por un disco cilíndrico imantado en posición longitudinal al eje, como vemos en la [Figura 4-1](#) y en la [Figura 4-2a](#). Éste (el eje) está altamente magnetizado produciendo el flujo unipolar de la [Figura 4-2b](#). Las líneas magnéticas que genera el imán son guiadas por dos cilindros acoplados a los extremos de cada uno de sus polos (norte y sur). Los polos del rotor están hechos generalmente por láminas de material ferro-magnético y dentados.

En la [Figura 4-2](#) vemos el esquema básico de un motor híbrido de ángulo de paso de 90°. Para obtener ángulos de paso más pequeños, debemos incrementar el número de polos del rotor y del estator. El número de pasos, entonces, está limitado por número de polos que puede albergar el estator y el número de dientes de cada uno.

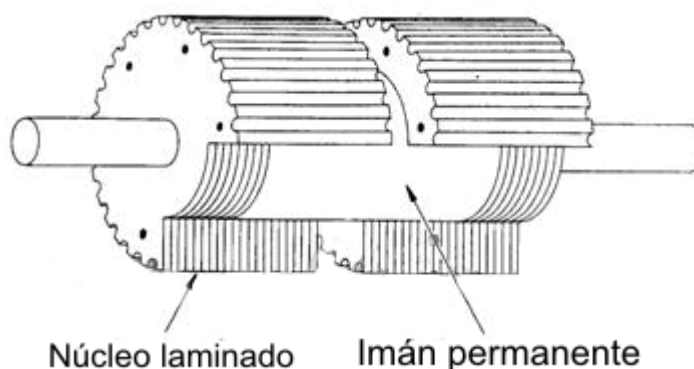


Figura 4-1: Estructura de un motor paso a paso híbrido.

⁴ Si el método no consume energía, quiere decir que la misma viene del mismo motor, aunque en el libro no hay ninguna referencia a esto.

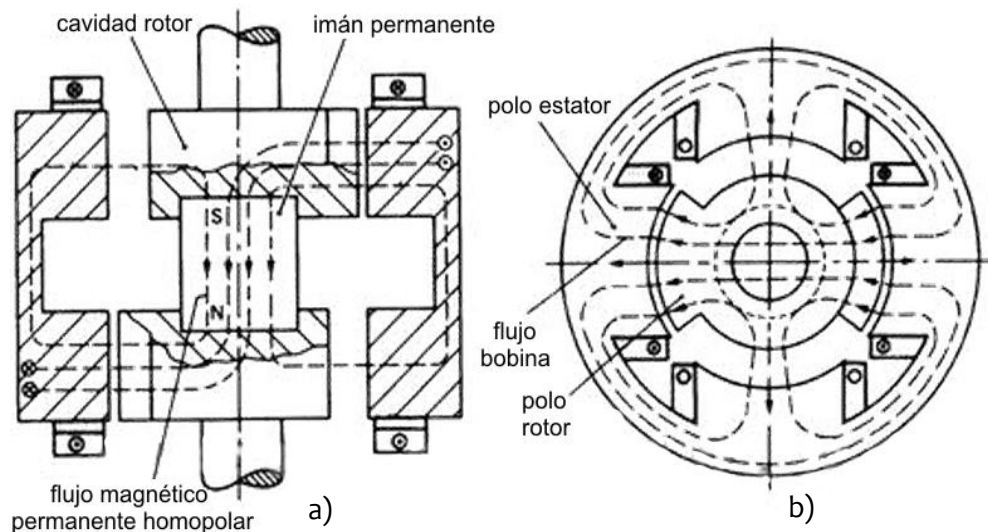


Figura 4-2: Corte transversal y vista frontal del motor paso a paso híbrido.

4.1 – Nuevo motor paso a paso híbrido

En la Figura 4-3 podemos ver este motor. El estator consta de dos bloques (con bobinas anulares para sus devanados) unidos por un imán permanente (Ferroxdure 370). Cada uno de estos bloques está formado por dos copas (de hierro sintetizado) magnéticamente conductoras con dientes y una bobina anular, donde una copa corresponde a un polo del motor híbrido convencional. El rotor es un eje en el que van montados cuatro discos (de hierro macizo) dentados.

Cada bloque del estator corresponde a una fase y el motor usa solamente un par de polos por fase. La cantidad de dientes es igual tanto en los discos del rotor como los del estator. Cada lado (que vamos a llamarle por comodidad «discos») de las copas del estator están a la misma «altura» que los discos del rotor, de manera que éstos últimos puedan ser excitados por los primeros. Los dientes de cada uno de los discos del estator (4 en total) se encuentran alineados entre sí, mientras que los dientes de los discos del rotor seguirán una pauta en su alineación. Esta pauta depende de cómo energicemos las bobinas anulares. Supongamos que los dientes del disco 1 del estator están alineados con los dientes del disco 1 del estator, entonces, los dientes de los discos contiguos del estator, llamémosles 2, 3 y 4, estarán desplazados 120, 90 y 270 **grados eléctricos** respectivamente respecto de sus correspondientes del estator. Es decir, los discos 1 de rotor y estator tendrán sus dientes alineados; los discos 2 estarán desfasados 120°; los discos 3, 90°; y los discos 4, 270°, siempre grados eléctricos.

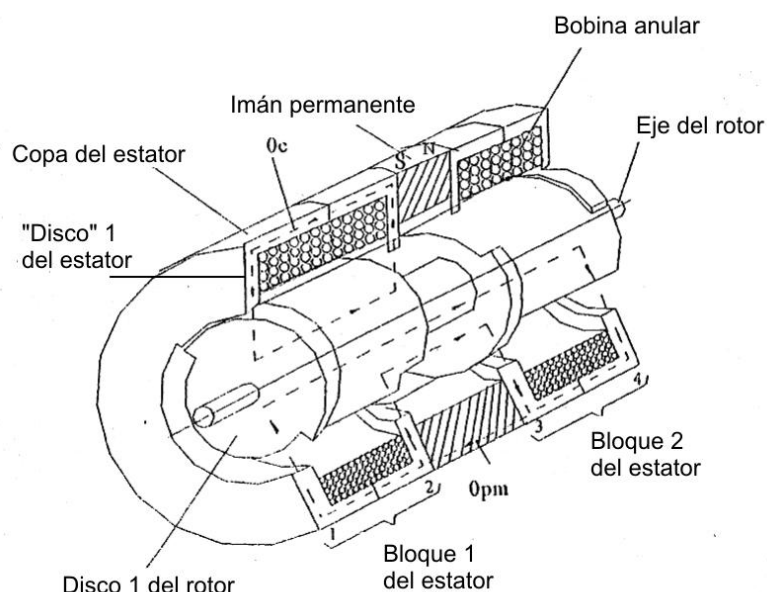


Figura 4-3: Esquema del nuevo motor paso a paso híbrido.

Funcionamiento: la colocación del imán permanente es diferente a la de otros motores híbridos, por lo que el flujo también lo será. El imán hace pasar el flujo de un bloque del estator al otro, usando al rotor como «puente». Así, (el imán) actúa como un gran entrehierro separando magnéticamente los bloques del estator.

El flujo en los discos no es igual pero la suma de los flujos se mantiene constante en el tiempo, por lo que concluimos que el rotor no tiene una posición preferida. Supongamos que el disco 1 es atravesado por un flujo mayor que el que atraviesa el disco 2 (pues la reluctancia es mínima en este último), cuando excitamos una bobina anular, el flujo circula de un disco a otro a través de dos discos del rotor con la «ayuda» del imán permanente. El flujo no puede pasar desde cualquier disco a cualquier disco, puede pasar del disco 1 al 3, o viceversa, o del disco 2 al 4 (o viceversa nuevamente).⁵

Debido a que el imán permanente aumenta el flujo en un disco y lo disminuye en otro, el rotor girará para corregir este desbalance. Cuando las bobinas anulares de los dos bloques son excitadas en forma alternada y en ambas direcciones, el flujo aumenta en cada disco por vez y el rotor gira dando 1/4 de paso de diente.

⁵ Textualmente, el libro del Ubal dice: «... circula un flujo desde una copa del estator, a través de dos discos del rotor, hasta la otra copa de la misma parte del rotor.» No sé si estará bien la interpretación que le di, tampoco el dibujo ayuda demasiado, pues el flujo de la parte superior del dibujo (ϕ_c) atraviesa los discos 1 y 2, es decir se queda en el bloque 1; en cambio el flujo de la parte inferior del dibujo (ϕ_{pm}) atraviesa todos los discos del rotor y del estator, es decir, atraviesa los dos bloques.

