



**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIEROS DE SAN SEBASTIÁN**

TECNUN

UNIVERSIDAD DE NAVARRA

*Trabajo de Sistemas Eléctricos - CURSO 2005 - 2006*

**DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN MOTOR DE  
CORRIENTE CONTINUA**

# ÍNDICE

1	Diseño de un Motor de Corriente Continua .....	3
2	Datos de Partida del Trabajo .....	5
3	Objetivo .....	5
4	Funcionamiento Básico de una Máquina de Corriente Continua.....	6
5	Balance de Potencias .....	8
6	Obtención de los Parámetros del Motor .....	9
6.1	Obtención de los Parámetros Constructivos del Motor .....	9
6.2	Parámetros de los Bobinados.....	12
7	Cálculo del Circuito Magnético .....	14
8	Ejemplos de Máquinas y Bobinados de Estator y Rotor .....	15

## 1 Diseño de un Motor de Corriente Continua

El trabajo consiste en el diseño y fabricación de un motor de corriente continua de forma artesanal.

Una máquina (generador o motor) de CC está constituida por una parte fija o estator y una parte móvil o rotor. En la figura 1 se muestra un esquema básico de la forma física que presenta este tipo de máquinas. El estator está formado por la culata (1) que pertenece al circuito magnético del inductor y que tiene como función, además de conducir el flujo, hacer de soporte mecánico del conjunto. En las máquinas pequeñas se construye de hierro fundido y, en las grandes, con plancha de acero curvada. La culata o carcasa contiene también los pies (13) sobre los que se apoya la máquina.

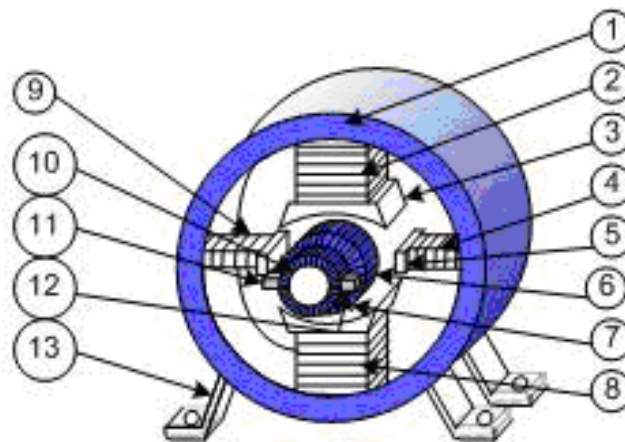


Figura 1. Aspectos constructivos de una Máquina de CC

En la parte interna de la culata se fijan los polos, que están constituidos por los núcleos (2), realizados en chapas de acero apiladas, sobre los que se coloca el devanado inductor o de excitación (8). La parte de los polos que está enfrentada al rotor a través del entrehierro se ensancha para abarcar una mayor sección mediante la cabeza o zapata polar (3). Para mejorar la conmutación (problemas de la reacción de inducido), estas máquinas suelen llevar otros polos intermedios (4) y (5), que reciben también el nombre de polos auxiliares o de conmutación. El devanado (9) de estos polos se conecta en serie con el inducido. En el trabajo que nos ocupa, la máquina no tendrá polos auxiliares.

El rotor está formado por el inducido (6) y el colector de delgas o conmutador (10). El inducido se construye con discos de chapa de acero al silicio que presenta una serie de ranuras (y dientes) para alojar en ellas el correspondiente devanado.

Los devanados de inducido de las máquinas de CC son habitualmente cerrados, lo cual indica que el bobinado se cierra sobre sí mismo sin principio ni fin y pueden ser de dos tipos: **imbricados** y **ondulados**, dependiendo de si se cruzan o no las partes de la bobina observadas desde el lado del colector.

Sin embargo, para mayor sencillez en el desarrollo del trabajo, no se van a utilizar estos tipos de bobinado ya que son costosos de generar y la dificultad aumenta mucho. Se trabajará, tal como se explica en el apartado 5 con una máquina de polos salientes en el estator y con bobinado imbricado u ondulado en el rotor. También puede hacerse con polos salientes en el rotor, pero la

máquina no tendrá tan buen rendimiento.

En la figura 2 se muestran los dos tipos de devanados dibujados en perspectiva y en forma desarrollada:

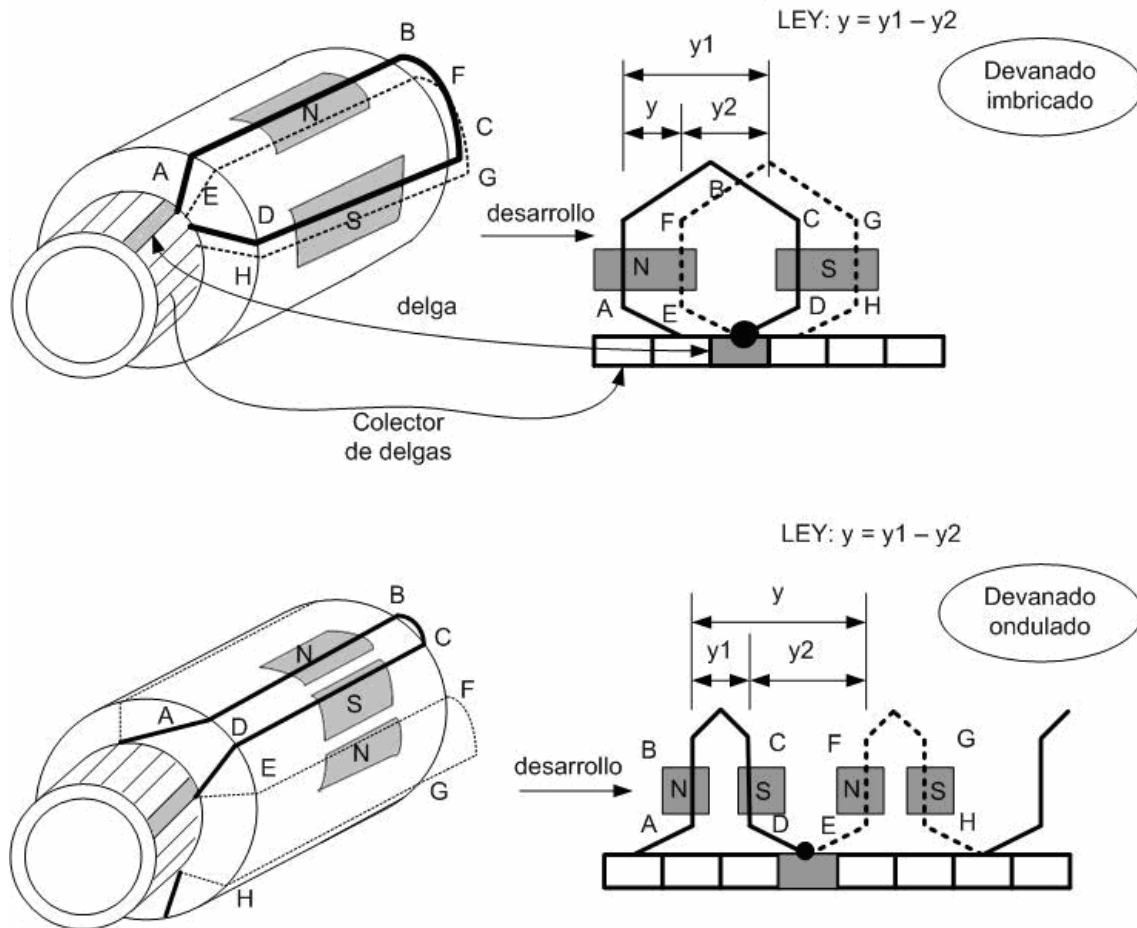


Figura 2. Bobinados cerrados de Máquinas de CC

Se observa en ambos casos que las bobinas que forman los devanados (imbricado u ondulado) constan de dos lados activos que se sitúan debajo de polos opuestos para conseguir la mayor tensión inducida posible. Esta posibilidad no se tendrá en la máquina que se diseñe, ya que las bobinas estarán concentradas en polos salientes del rotor.

El colector (con las delgas) es el elemento que caracteriza a estas máquinas y es el encargado de la conversión mecánica de la CA inducida en las bobinas en CC de salida, en el caso generador. En el motor, consigue mantener el campo del rotor formando siempre  $90^\circ$  eléctricos con el del estator, de manera que el par producido sea máximo.

La extracción o suministro de corriente al colector se realiza en las máquinas comerciales mediante escobillas de grafito. Las escobillas están fijas en el espacio (no se mueven), colocadas en el porta-escobillas, de manera que, mientras gira el rotor, las escobillas deslizan sobre las delgas pero conservan una posición invariable respecto de los polos. El porta-escobillas suele ser de bronce o latón y está unido al soporte por medio de un bulón convenientemente aislado. Las escobillas que tengan la misma polaridad se conectan en paralelo a un mismo terminal de salida

para su conexión al exterior.

El rotor se montará sobre un eje, que será el mismo para todos los grupos, este eje se conectará a un sistema de poleas (que no deberá ser construido por los alumnos), que servirá para poder elevar un determinado peso en el mínimo tiempo posible.

## 2 Datos de Partida del Trabajo

- Tensión de Alimentación. Las pruebas se realizarán en el Laboratorio de Electrotecnia de la Escuela y se trabajará con las fuentes de alimentación del Laboratorio: será de 30 V.
- Bobinas
  - $I_{\text{máx}}$  de alimentación de estator y rotor: 5 A (esto determinará el número de espiras de las bobinas de excitación y de inducido).
  - Tensión de alimentación: 30 V
  - Diámetros nominales de hilo esmaltado utilizables: 0.80, 1.00, 1.30 y 1.60 mm.
- Polea conectada al eje de salida:
  - Diámetro: 10 cm
- Condiciones de elevación de peso:
  - Máxima masa que pueda elevarse (Par máximo del motor)
  - Altura de elevación: 1 m
  - Tiempo para elevar la masa: 2 s
- Número de polos motor: 2 ó 4
- Dimensiones máximas del rotor:
  - Máximo Volumen: 300 cm<sup>3</sup>.
  - Máximo diámetro, D: 60 mm
  - Máxima Longitud, l: 100 mm
- Máximo volumen del motor: 600 cm<sup>3</sup>.

## 3 Objetivo

Diseñar un motor de corriente continua de dos o cuatro polos de manera que cumpla con los requisitos de potencia, par y tensión que se piden.

El motor deberá elevar el máximo peso posible (par). Se medirá el par cuando el motor eleve esa carga un metro en dos segundos.

En la valoración del trabajo estará el rendimiento del motor (relación entre la potencia de salida y de entrada), su tamaño o volumen y la imaginación y originalidad en su elaboración.

Asimismo, se valorará que en el funcionamiento de la máquina como generador se proporcione una tensión sin demasiado rizado.

## 4 Funcionamiento Básico de una Máquina de Corriente Continua

Para utilizar la tensión producida en el inducido y llevarla a un circuito exterior se han de conectar unas escobillas de salida, situadas en el eje transversal de los polos para que puedan aprovechar la máxima tensión inducida del devanado. Estas escobillas dividen el arrollamiento en dos ramas en paralelo con una misma tensión inducida. En cada una de estas ramas, las tensiones inducidas deben tener el mismo sentido pues, de lo contrario, no se utilizarían totalmente las tensiones inducidas generadas en el arrollamiento (como caso límite, si las escobillas se disponen bajo los centros de los polos, la tensión entre ellas sería nula).

El eje que forma la alineación de las escobillas se denomina **línea neutra**. Esta línea tiene gran importancia, pues indica las posiciones en las que se produce la inversión de tensión inducida en las bobinas del inducido pasando las espiras correspondientes de una rama paralelo a la otra.

En los inducidos que llevan un devanado imbricado simple el número de circuitos derivados coincide con el de polos. Si se denomina “2p” al número de polos y “2c” al número de circuitos derivados o ramas en paralelo, se tendrá que:

$$\text{IMBRICADO SIMPLE:} \quad 2c = 2p \quad (1)$$

En los devanados ondulados simples, el número de circuitos derivados es siempre igual a 2, sea cual sea el número de polos de la máquina, es decir:

$$\text{ONDULADO SIMPLE:} \quad 2c = 2 \quad (2)$$

Para calcular la tensión producida en el inducido de una máquina de CC debe tenerse en cuenta que, en cada conductor del inducido, se obtiene una tensión alterna. En cada período eléctrico, la inducción aplicada varía entre los límites +B y -B (generadas por el inductor).

Sabiendo que la superficie del inducido en un paso polar de la máquina es igual a:

$$S_p = \frac{\pi D l}{2p} \quad (3)$$

El flujo (flujo por polo) que aporta un polo de la máquina es:

$$\phi_p = B \frac{\pi D l}{2p} \quad (4)$$

La velocidad tangencial de cada conductor de la máquina será:

$$u = \omega \frac{D}{2} = n \frac{2\pi D}{60} \frac{D}{2} \quad (5)$$

Así, sabiendo que la tensión inducida en un conductor cuando está sometido a una inducción B es igual a  $B l u$ . La tensión inducida en este caso, será:

$$e_k = 2 \phi_p \frac{pn}{60} \quad (6)$$

Sabiendo que las escobillas de la máquina recogen las tensiones inducidas en los distintos conductores durante un semiperíodo, la tensión resultante en el inducido será igual a la suma de las tensiones de los conductores que componen cada rama en paralelo del devanado. Si éste consta de Z conductores y está dividido por las escobillas en 2c circuitos derivados, se tendrán en cada rama  $Z/2c$  conductores conectados en serie. Y teniendo en cuenta la relación (6), todos ellos producirán una tensión inducida resultante de magnitud:

$$E_i = \frac{n}{60} Z \phi_p \frac{p}{c} = K_E n \phi_p \quad (7)$$

En la expresión anterior,  $K_E = Z p / 60 c$  es una constante determinada para cada máquina.

De esta expresión se deduce que la tensión inducida puede regularse, variando la velocidad del rotor o cambiando el flujo inductor mediante el ajuste de la corriente de excitación de los polos.

La contrapartida de esta generación de energía eléctrica es un par resistente de tipo magnético generado al circular corrientes por el devanado del inducido.

Es importante indicar que, en los motores, el giro de la máquina es el resultado de la interacción del flujo del inductor con las corrientes del inducido al conectar éste a una fuente de CC. Esto genera una fuerza que provocará el movimiento, pero también una tensión inducida de reacción en el rotor que se opone a la tensión aplicada en el inducido y que, por ello, recibe el nombre de **fuerza contraelectromotriz** (fcem). Pero, en realidad, es el mismo fenómeno que el descrito para un generador.

En cuanto al caso de un motor, el paso de una corriente continua por los conductores del inducido provoca en el rotor un par electromagnético. Para calcular la magnitud de este par, debe tenerse en cuenta que si  $I_i$  es la corriente total del inducido, la corriente que circula por los conductores del rotor en una máquina con 2c circuitos derivados será  $I_i/2c$ . Y, si denominamos B a la inducción de los polos y l a su longitud, la fuerza magnética resultante en cada conductor de acuerdo con la ley de Lorentz será:

$$F_{mg} = B l \frac{I_i}{2c} \quad (8)$$

Esta fuerza tiene sentido tangencial al rotor. Siendo D el diámetro del rotor y Z el número de conductores del inducido, se obtendrá un par magnético resultante de magnitud:

$$T_{mg} = \frac{D}{2} F_{mg} Z = \frac{D}{2} B l \frac{I_i}{2c} Z \quad (9)$$

Como el valor del flujo por polo es:

$$\phi_p = B \frac{\pi D L}{2 p} \quad (10)$$

El par de la máquina en función del flujo por polo será:

$$T_{mg} = \frac{1}{2\pi} \frac{p}{c} Z \phi_p I_i = K_T I_i \phi_p \quad (11)$$

Siendo  $K_T = Z p / 2\pi c$  una constante determinada para cada máquina. Está relacionada con la constante  $K_E$ , según la expresión:

$$K_E = \frac{2\pi}{60} K_T$$

Si se tiene en cuenta (4.6), la ecuación anterior puede expresarse en función de la tensión del inducido, resultando:

$$T_{mg} = \frac{E_i I_i}{2\pi \frac{n}{60}} \quad (12.a)$$

Este par, si se descuenta el de pérdidas por rozamiento y ventilación, se transforma en un par mecánico útil en el exterior. En cualquier caso, el numerador de (12.a) representa la potencia electromagnética que se extrae del motor y que es, en definitiva, el producto del par por la velocidad angular, es decir:

$$P = E_i I_i = T_{mg} \omega = T_{mg} 2\pi \frac{n}{60} \quad (12.b)$$

Cuando la máquina de CC funciona como motor, se debe aplicar una tensión de CC de alimentación al inducido, que provoca una corriente de circulación por los conductores de este devanado. La interacción de estas corrientes con el flujo inductor origina un par de rotación que obliga a girar a la máquina. Este movimiento conduce asimismo a la aparición de una tensión en el inducido.

En consecuencia esta tensión generada se opone a la causa que ha producido el fenómeno; es decir, a la tensión aplicada en el inducido y, por ello, recibe el nombre de *fuerza contraelectromotriz*. El movimiento del motor se mantendrá siempre y cuando el par electromagnético producido sea mayor que la suma de los pares de la carga mecánica y del rozamiento de los elementos mecánicos.

## 5 Balance de Potencias

Para determinar el proceso de transformación de energía eléctrica en mecánica en un motor de CC se ha de obtener una ecuación del balance de potencias que es la siguiente:

$$P_E = V I = V I_e + V I_i = V I_e + E_i I_i + R_i I_i^2 + V_{esc} I_i \quad (13)$$



cuyos términos significan:

- $P_e = VI_e$ : Potencia eléctrica absorbida por el inductor del motor (pérdidas en el cobre).
- $P_i = VI_i$ : Potencia eléctrica absorbida por el inducido del motor.
- $P_{Cui} = R_i I_i^2$ : Pérdidas en el cobre del inducido.
- $P_{esc} = V_{esc} I_i$ : Pérdidas en los contactos de las escobillas.
- $P_{mg} = E_i I_i$ : Potencia electromagnética desarrollada por la máquina.

La potencia electromagnética,  $P_{mg}$ , expresa la potencia mecánica total que produce el motor y que está relacionada con el par electromagnético a través de la velocidad de giro.

Para calcular la potencia mecánica útil en el eje del motor, habrá que restar a la potencia electromagnética,  $P_{mg}$ , las pérdidas en el hierro,  $P_h$ , y las pérdidas mecánicas,  $P_{Roz}$ , por rozamiento y ventilación. En consecuencia la potencia útil del motor,  $P_u$ , se podrá escribir:

$$P_u = P_m - P_h - P_{Roz} \quad (14)$$

## 6 Obtención de los Parámetros del Motor

En este apartado se explicará resumidamente la forma en que se deben calcular los parámetros del motor para que se ajusten a las condiciones dadas en el trabajo.

### 6.1 Obtención de los Parámetros Constructivos del Motor

Se trabajará eligiendo en primer lugar los siguientes parámetros de la máquina:

1. Número de polos,  $2p$ . Lo mejor será utilizar dos polos, aunque puede diseñarse una máquina de cuatro polos.
2. Elección del diámetro,  $D$ , y de la longitud,  $l$ , de la máquina. Siempre de acuerdo con las especificaciones del trabajo.
3. Elección de la inducción en el entrehierro,  $B_a$ . Se tomará un valor comprendido entre 0,4 y 0,6 T. De todas formas, se pueden tomar valores mayores o menores.
4. Elección aproximada del entrehierro,  $g$ . Se podrá tomar un valor de 2 mm, pero es posible que por el tipo de construcción de la máquina sea finalmente algo mayor.
5. Cálculo de las Bobinas Inductoras
  - Con los datos anteriores se puede obtener la fmm necesaria:

$$N_e I_e = \frac{g B_a}{\mu_0} \quad (15)$$

Y, con las expresiones de determinación de las bobinas, se puede calcular el área transversal de las bobinas de inductor. Se puede tomar como densidad de corriente en los conductores,  $3 \text{ A/mm}^2$  y un coeficiente de relleno de entre 0,4 y 0,6.

Debe verse si la bobina diseñada puede entrar en la máquina y, eligiendo un diámetro de conductor, el valor total de la resistencia de las bobinas (habitualmente, en los motores derivación la resistencia de inductor es un valor elevado y la corriente pequeña). Asimismo, se determinará la corriente y si es posible alimentar estas bobinas con las fuentes de 30 V y 5 A del Laboratorio.

Finalmente, se verá si la máquina total tiene un volumen menor del especificado.

#### 6. Cálculo del Bobinado del Inducido

- Se elige el número de ranuras, de bobinas y de delgas (iguales los tres). Se tomará con preferencia un valor para de delgas comprendido entre 6 y 12. De todas maneras pueden tomarse otros números diferentes. Habrá de comprobarse que la tensión entre delgas es menor de 7.5 V.
- Se toma un tipo de bobinado y el número de caminos en paralelo,  $2c$ .
- Se toma un número de espiras por bobina. Así se obtiene el número total de conductores;  $Z$ , del inducido.
- Con los datos anteriores, se obtiene la longitud aproximada de todas las bobinas del rotor (normalmente, será diametrales). Y eligiendo un diámetro de conductor adecuado para que el bobinado pueda ser colocado en las ranuras del rotor, se puede obtener su resistencia. Este valor no debe ser elevado; en todo caso, mucho menor que el de la resistencia de inductor.
- Debe comprobarse que la corriente de arranque del motor no es excesivamente elevada.
- Asimismo, debe verse que no existe saturación en el rotor.

#### 7. Velocidad de vacío

$$n_o = \frac{V}{K_E \phi_p} \quad (16)$$

- Debe comprobarse que la velocidad de vacío no es demasiado elevada. Un valor de aproximadamente 2000 rpm, puede ser adecuado.

#### 8. Par electromagnético desarrollado

- Se calculará el par de arranque de acuerdo con el valor de la corriente de arranque del motor.
- Se obtendrá la curva T-n del motor. Asimismo, se pueden hallar las relaciones entre corriente y velocidad, etc.

- A partir de la curva de par-velocidad, se obtendrá el punto de funcionamiento con una carga que pueda ser elevada en dos segundos a un metro de altura. Esto proporcionará el par desarrollado por la máquina.
- Téngase presente que existirán pérdidas por rozamiento y ventilación, así como en el hierro. Habrán de estimarse. Además, existirán las pérdidas en el cobre en el inductor y en el inducido.

Finalmente, se puntuará positivamente que el motor logre elevar la masa en el menor tiempo posible, con el menor volumen. El volumen del motor es:

$$Vol = \frac{\pi D^2}{4} l \quad (17)$$

Para calcular el arco polar en la circunferencia de la armadura, cada grupo debe considerar el abarcamiento polar que crea necesario, tomando en cuenta que mientras más abarcamiento polar exista, habrá mayor número de conductores activos (conductores que se encuentran debajo del polo del estator), esto se muestra mejor en la siguiente figura:

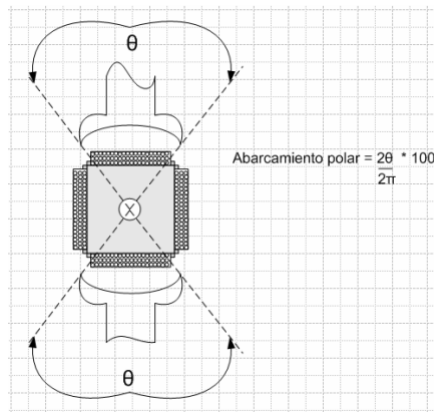


Figura 3. Abarcamiento Polar

La longitud del entrehierro puede comprobarse en la siguiente gráfica. Se necesita el diámetro de la armadura del motor.

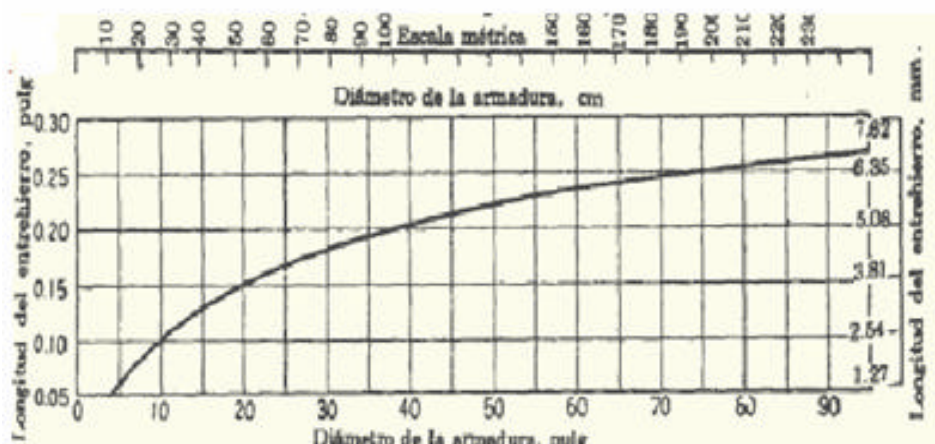


Figura 4. Longitud aproximada de entrehierro para Máquinas de CC

También se puede conocer la densidad de flujo (o inducción) en el entrehierro, si se conoce la relación entre potencia del motor y velocidad de giro, según la gráfica:

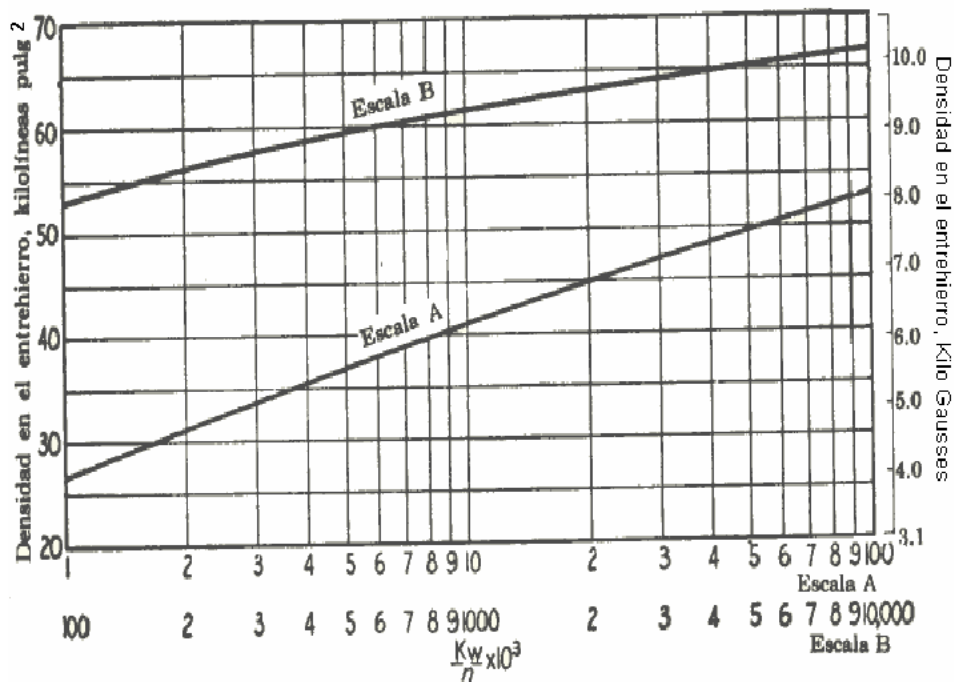


Figura 5. Inducciones de Entrehierro para Máquinas de CC

Téngase en cuenta que una inducción de 10 kG es 1 T en el S.I.

## 6.2 Parámetros de los Bobinados

Para realizar el bobinado, dado que el número de espiras con las que deberán fabricar las bobinas no va a ser demasiado elevado, los alumnos trabajarán en el laboratorio con una bobinadora manual. Cada grupo acudirá al laboratorio de acuerdo con el horario al que se haya apuntado en las tablas disponibles en el Laboratorio.

Para ello, es necesario realizar unos cálculos previos tal como se explica a continuación. Debe estar definido el diámetro de hilo que se va a utilizar y el número de espiras que debe llevar cada bobina. Fíjense que las corrientes que van a circular por las bobinas determinarán la sección y el diámetro de los conductores elegidos. Téngase también en cuenta que los dos extremos de las bobinas deben tener la suficiente longitud para poder conectarlos a la fuente de alimentación del laboratorio o a las delgas correspondientes.

Para definir completamente la bobina es necesario determinar sus dimensiones (altura y diámetros interior y exterior), el tamaño del conductor que la forma y el número de espiras. Estos parámetros son dependientes entre sí y son suficientes para obtener la resistencia de la bobina. A continuación se ve la relación entre parámetros de la bobina y del polo donde deberá colocarse:

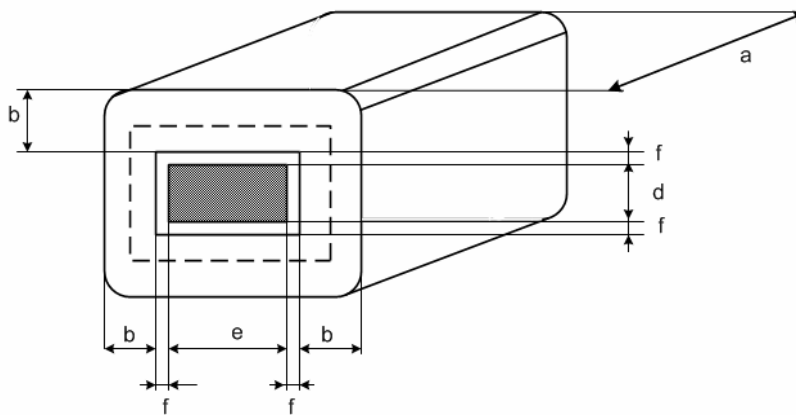


Figura 6. Parámetros Físicos de una Bobina (1)

Las dimensiones de la bobina son: “a” es la altura de la bobina, “b” su espesor, “d” y “e” son las dimensiones del núcleo, “f” el espesor de aislamiento y LMB la longitud media de bobina o de espira (se le llama también  $l_m$ ).

Así, se cumple que

$$LMB = 2(d + 2f) + 2(e + 2f) + \pi b \quad (18)$$

$$l_{Bobina} = LMB N \quad (19)$$

$$R_{Bobina} = \rho \frac{LMB N}{s} \quad (20)$$

donde “N” es el número de espiras, “p” la resistividad ( $\rho_{Cu}=1.72 \mu\Omega/cm$  y  $\rho_{Al}=2.83 \mu\Omega/cm$ ) y “s” la sección efectiva del conductor.

Por otra parte, la relación entre las dimensiones de las bobinas y el número de capas y de espiras por capa es la siguiente:

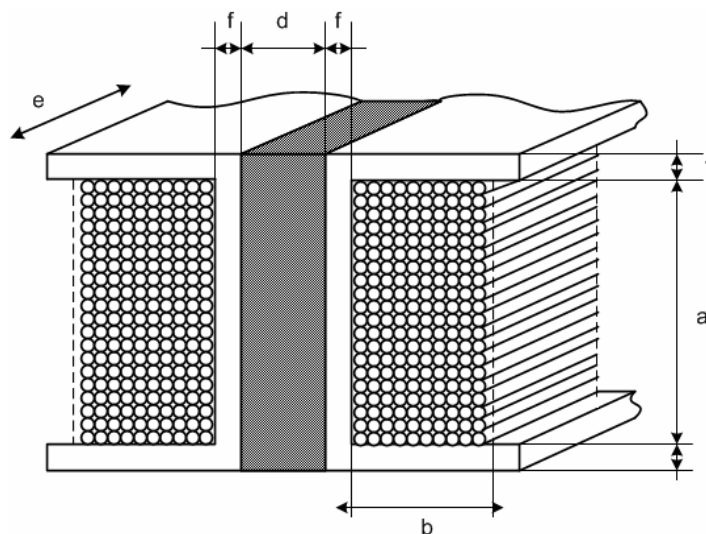


Figura 7. Parámetros Físicos de una Bobina (2)

$$a \approx \frac{D_{\text{cond}}}{2} (1 + 2N_E) \quad (21)$$

$$b \approx \frac{D_{\text{cond}}}{2} [2 + (N_C - 1)\sqrt{3}] \quad (22)$$

siendo  $N_E$  el número de espiras por capa y  $N_C$  el número de capas de la bobina.  $N = N_E N_C$ .

No toda la superficie  $a.b$  será efectiva. Normalmente esto se mide con el coeficiente de llenado, que será un valor de 0.55, aproximadamente.  $0.4 = k_v = 0.6$ .

Tras comprobar con diferentes tamaños de conductor las posibilidades de diseño dentro de las restricciones se seleccionarán las bobinas que proporcionen una fuerza magnetomotriz mayor, puesto que ésta hará circular una mayor cantidad de flujo magnético. También se deben tener en cuenta otras circunstancias: por ejemplo, desechar bobinas extremadamente esbeltas o extremadamente chatas en las que el montaje del núcleo sería demasiado complicado. Y, obviamente, las dimensiones de la máquina, que impedirán que el tamaño de las bobinas pueda ser cualquiera.

## 7 Cálculo del Circuito Magnético

Para un motor CC de **dos polos** se tendría el siguiente circuito magnético aproximado:

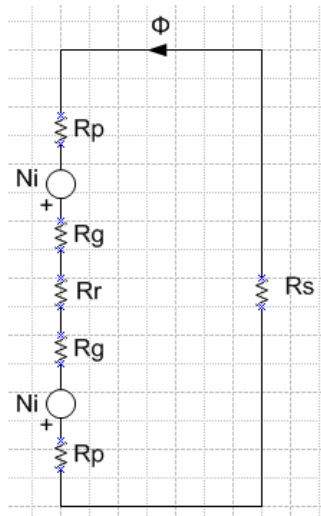


Figura 8. Circuito Magnético para Máquina de CC de dos polos

Siendo  $R_p$ ,  $R_g$ ,  $R_r$  y  $R_s$ ; las reluctancias de polo, entrehierro, rotor y estator respectivamente.

El flujo que circula por el circuito magnético mostrado (flujo por polo) será:

$$\phi_p = \frac{2 N_e I_e}{R_s + R_r + 2R_g + 2R_p} \approx \frac{2 N_e I_e}{2R_g} \approx \frac{N_e I_e}{R_g} = \frac{N_e I_e}{\frac{1}{\mu_0} \frac{g}{S_{\text{polo}}}} \quad (23)$$

donde  $N_e$  es el número de vueltas de conductor utilizado en las bobinas del estator e  $I_e$  la corriente que circula por éstas. La longitud de entrehierro,  $g$ , se ha calculado en el apartado anterior según el diámetro del estator.

Entonces se puede obtener la inducción magnética en el entrehierro y en los núcleos de los polos mediante:

$$B_a = \frac{\phi_p}{S_{\text{polo}}} = \mu_o \frac{N_e I_e}{g} \qquad B_n = \frac{\phi_p}{S_{\text{núcleo}}} \qquad (24)$$

Si la inducción en el núcleo polo supera la de saturación del material elegido habrá que modificar las dimensiones del núcleo o cambiar la fmm aplicada.

Con estos parámetros obtenidos del circuito magnético se puede tener una idea de la tensión de inducido y del par electromagnético mediante las expresiones ya conocidas.

## 8 Ejemplos de Máquinas y Bobinados de Estator y Rotor

A continuación se muestran algunas fotos de distintos motores de CC tomadas en el Laboratorio de Electrotecnia de la Escuela. Pueden servir para tener una idea de lo que se tiene que llegar a construir.

