



# Generación, transporte y distribución de energía eléctrica

**Manuel Alcázar Ortega | César S. Cañas Peñuelas |  
Guillermo Escrivá Escrivá | Vicente Fuster Roig |  
José Roger Folch**



**Editorial**

Universitat Politècnica  
de València

Manuel Alcázar Ortega  
César S. Cañas Peñuelas  
Guillermo Escrivá Escrivá  
Vicente Fuster Roig  
José Roger Folch

# Generación, transporte y distribución de energía eléctrica



**Editorial**

Universitat Politècnica  
de València

Colección *Académica*

Para referenciar esta publicación utilice la siguiente cita: Alcázar Ortega, Manuel; Cañas Peñuelas, César S.; Escrivá Escrivá, Guillermo; Fuster Roig, Vicente; Roger Folch, José (2019). *Generación, transporte y distribución de energía eléctrica*. Valencia: Editorial Universitat Politècnica de València

© Manuel Alcázar Ortega  
César S. Cañas Peñuelas  
Guillermo Escrivá Escrivá  
Vicente Fuster Roig  
José Roger Folch

© 2019, Editorial Universitat Politècnica de València  
Venta: [www.lalibreria.upv.es](http://www.lalibreria.upv.es) / Ref.: 0836\_03\_01\_01

Imprime: Byprint Percom, sl

ISBN: 978-84-9048-771-6

La Editorial UPV autoriza la reproducción, traducción y difusión parcial de la presente publicación con fines científicos, educativos y de investigación que no sean comerciales ni de lucro, siempre que se identifique y se reconozca debidamente a la Editorial UPV, la publicación y los autores. La autorización para reproducir, difundir o traducir el presente estudio, o compilar o crear obras derivadas del mismo en cualquier forma, con fines comerciales/lucrativos o sin ánimo de lucro, deberá solicitarse por escrito al correo [edicion@editorial.upv.es](mailto:edicion@editorial.upv.es).

## Contenidos

Introducción.....	7
1. Generación de energía eléctrica: introducción al generador síncrono ..	9
1.1. Principios de funcionamiento.....	9
1.1.1 Funcionamiento de la máquina rotativa elemental (m.e.r.) como máquina síncrona.....	9
1.1.1.1 Funcionamiento como generador.....	9
1.1.1.2 Funcionamiento como motor.....	11
1.1.2 Principios de funcionamiento de una máquina síncrona real .....	13
1.1.2.1 Funcionamiento como generador.....	14
1.1.2.2 Funcionamiento como motor.....	17
1.2. Constitución de las máquinas síncronas.....	18
1.2.1 Composición .....	18
1.2.1.1 Devanado inducido.....	18
1.2.1.2 Devanado inductor de excitación.....	19
1.2.1.3 Devanado amortiguador.....	21
1.2.2 Refrigeración de las máquinas síncronas.....	23
1.2.3 Utilización y clasificación de las máquinas síncronas .....	26
1.2.3.1 Turboalternadores .....	27
1.2.3.2 Generadores Hidráulicos.....	27
1.2.3.3 Generadores de usos varios (generadores industriales).....	28
1.2.3.4 Motores .....	28
1.2.3.5 Compensadores Síncronos .....	28
1.2.3.6 Generadores Eólicos .....	29
1.2.4 El sistema de excitación.....	30
1.2.4.1 Definición .....	30
1.2.4.2 Funciones del sistema de excitación de la máquina (ver Norma UNE EN 60034-16-1) .....	30
1.2.4.3 Magnitudes y parámetros básicos.....	31
1.2.5 Descripción de los diferentes sistemas de excitación.....	32

1.2.5.1	Excitación con alternador y rectificador (b.2.1) .....	34
1.2.5.2	Autoexcitación derivación pura (b.3.2.1).....	35
1.2.5.3	Excitación con diodos giratorios .....	35
1.3.	Funcionamiento en vacío y en carga .....	37
1.3.1	Funcionamiento en vacío.....	38
1.3.2	Funcionamiento en carga .....	41
1.3.3	Circuito equivalente y diagrama fasorial de una MS ideal .....	45
1.3.4	Determinación de la reactancia síncrona.....	49
1.3.5	Introducción al análisis del funcionamiento de la ms real.....	52
1.3.6	Expresión de la impedancia en valores por unidad (pu) .....	53
1.4.	Máquina síncrona en servicio .....	54
1.4.1	Modos de funcionamiento.....	54
1.4.2	Potencia activa y reactiva en máquinas síncronas de rotor cilíndrico.....	56
1.4.3	Curvas de potencia y par. Par sincronizante. Ángulo de par .....	58
1.5.	Máquina Síncrona acoplada a una red de potencia infinita.....	63
1.5.1	Generalidades.....	63
1.5.2	Estudio del funcionamiento como motor y como generador .....	64
1.5.3	Límites de funcionamiento como generador .....	69
1.6.	Bibliografía .....	71
2.	Transporte y distribución de energía eléctrica.....	73
2.1.	Tipos de líneas. Elementos que las componen .....	73
2.1.1	Introducción.....	73
2.1.2	Transporte y distribución. ....	74
2.1.3	Tipos de líneas.....	74
2.1.4	Conductores de líneas aéreas. ....	75
2.2.	Introducción al modelo de línea. ....	79
2.2.1	Inductancia aparente. ....	81
2.2.2	Capacidad al neutro.....	82

2.2.3 Circuito monofásico equivalente. ....	83
2.3. Parámetros de líneas. ....	84
2.3.1 Resistencia. ....	84
2.3.2 Inductancia. ....	84
2.3.2.1 Inductancia interna unitaria de un conductor cilíndrico. ....	84
2.3.2.2 Inductancia unitaria de un tubo coaxial exterior a un conductor cilíndrico. ....	85
2.3.2.3 Inductancia unitaria de una línea monofásica. ....	86
2.3.2.4 Sistema de conductores cilíndricos paralelos. Inductancia aparente de un conductor. ....	88
2.3.2.5 Casos particulares. ....	90
2.3.2.6 Transposición de fases. ....	93
2.3.3 Capacidad. ....	94
2.3.3.1 Potenciales creados por un conductor rectilíneo de longitud infinita cargado con $q$ (C/m). ....	94
2.3.3.2 Capacidad de dos conductores cilíndricos coaxiales de radios $R_1$ y $R_2$ y cargados con $+q$ C/m y $-q$ C/m. Cable AT. .	95
2.3.3.3 Diferencia de potencial entre dos conductores paralelos cargados con $+q$ C/m y $-q$ C/m separados una distancia $d$ . .	96
2.3.3.4 Capacidad de dos conductores rectilíneos paralelos de radios $r$ y cargados con $+q$ C/m y $-q$ C/m. Línea monofásica. ....	97
2.3.3.5 Capacidades en líneas polifásicas. ....	98
2.3.3.6 Capacidad al neutro de líneas simétricas. ....	98
2.4. Modelos de líneas eléctricas. ....	101
2.4.1 Modelo serie. ....	101
2.4.2 Modelo en $\pi$ . ....	104
2.4.3 Capacidad de transporte. ....	105
2.5. Regulación de tensión. ....	106
2.5.1 Condensadores en serie. Compensación de líneas aéreas. ....	108
2.5.2 Condensadores en paralelo. ....	109
2.5.3 Compensadores estáticos. ....	110
2.6. Proyectos tipo. ....	110

2.6.1 Proyecto tipo de línea aérea de media tensión, realizada en simple circuito con cable de aluminio acero 47'AL1/8ST1A(LA 56). MT 2.21.60.....	111
2.6.1.1 Cálculo eléctrico de una línea de MT utilizando el proyecto tipo MT.2.21.60 .....	111
2.6.2 Proyecto tipo de línea subterránea de alta tensión hasta 30 kV. MT 2.31.01.....	112
2.6.2.1 Cálculo eléctrico de una línea de MT utilizando el proyecto tipo MT.2.31.01.....	112
2.7. Valores por unidad.....	113
2.8. Bibliografía.....	115
3. Flujo de cargas.....	117
3.1. Introducción.....	117
3.2. Planteamiento del problema del flujo de carga.....	117
3.3. Planteamiento del problema .....	118
3.4. Resolución del problema de flujo de carga por Gauss-Seidel .....	120
3.4.1 Caso unidimensional del método de iterativo Gauss-Seidel .....	121
3.4.2 Caso n-dimensional del método de iterativo Gauss-Seidel .....	121
3.4.3 Aplicación del método de iterativo Gauss-Seidel a la resolución del flujo de carga .....	121
3.5. Resolución del problema de flujo de carga por Newton-Raphson ....	124
3.5.1 Caso unidimensional del método de iterativo Newton-Raphson .....	124
3.5.2 Caso n-dimensional del método de iterativo Newton-Raphson .....	125
3.5.3 Aplicación del método de iterativo Newton-Raphson a la resolución del flujo de carga .....	125
3.5.4 Resolución del flujo de carga por el método iterativo Newton-Raphson desacoplado.....	130
3.6. Bibliografía .....	132

4.	Introducción al Mercado Ibérico de Electricidad .....	133
4.1.	Introducción .....	133
4.1.1	Tipos de mercado .....	135
4.1.1.1	Mercado mayorista.....	136
4.1.1.2	Mercado minorista .....	138
4.2.	El Mercado Ibérico de Electricidad.....	138
4.2.1	Tipos de mercado .....	140
4.2.2	Agentes del Mercado Ibérico de Electricidad.....	142
4.2.2.1	Agentes participantes en el MIBEL .....	142
4.2.2.2	Otros sujetos no participantes en el MIBEL .....	144
4.2.3	Mercados a corto plazo (mercado “Spot”).....	148
4.2.3.1	Mercado diario (“Pool”).....	148
4.2.3.2	Mercados intradiarios.....	162
4.2.4	Mercados a medio y largo plazo (mercado de futuros) .....	165
4.2.4.1	La gestión técnica del mercado de futuros: OMIP .....	165
4.2.4.2	La gestión económica del mercado de futuros: OMICLEAR..	166
4.2.4.3	Participantes en el mercado a plazo.....	166
4.2.4.4	Funcionamiento del mercado a plazo.....	167
4.2.4.5	Tipos de producto en el mercado de a plazo .....	170
4.2.4.6	Características de los contratos de futuros.....	171
4.2.4.7	Precio de referencia .....	173
4.2.5	Mercados de operación: servicios de ajuste del Operador del Sistema .....	175
4.2.5.1	Solución de restricciones técnicas .....	176
4.2.5.2	Asignación de servicios complementarios.....	177
4.2.5.3	Gestión de desvíos .....	180
4.2.6	Precio final del mercado: ¿qué pagan los consumidores? .....	180
4.2.6.1	Liquidación de los desvíos .....	181
4.2.6.2	Pérdidas en la red.....	183
4.2.6.3	Pagos por capacidad .....	184
4.2.6.4	Pagos a los operadores del mercado y del sistema .....	184
4.2.6.5	Pagos por el servicio de interrumpibilidad.....	185

4.2.6.6 Tasa municipal .....	185
4.2.7 Precio horario que paga el consumidor por la energía .....	186
4.3. Facturación y contratación de la electricidad en España.....	188
4.3.1 Estructura general de la factura eléctrica .....	188
4.3.2 Contrato regulado: Facturación en PVPC.....	190
4.3.2.1 Término de potencia.....	190
4.3.2.2 Término de energía .....	191
4.3.2.3 Bono social.....	193
4.3.2.4 Ejemplo de factura en tarifa regulada (PVPC).....	195
4.3.3 Contrato en mercado libre: facturación en mercado liberalizado.....	196
4.3.3.1 Ejemplo de factura en mercado liberalizado .....	198
4.3.4 Tarifas de Acceso.....	200
4.3.4.1 Tipos de tarifa de acceso.....	201
4.3.4.2 Precios vigentes de las tarifas de acceso para el año 2019..	209
4.3.4.3 Cálculo de los términos de la tarifa de acceso .....	211
4.3.5 Ejemplo de cálculo de una factura eléctrica .....	220
4.3.5.1 Características del contrato de suministro .....	220
4.3.5.2 Cálculo del coste de la energía.....	222
4.3.5.3 Cálculo de la tarifa de acceso .....	224
4.3.5.4 Cálculo de la factura total .....	229
4.4. Bibliografía .....	230

## Introducción

Los contenidos de este libro pretenden dar una visión general e integrada del sistema eléctrico de potencia.

Se ha dividido la materia en cuatro bloques:

1. Máquinas síncronas. Son aquellas en las que la velocidad de giro es igual a la velocidad de giro del campo magnético giratorio generado en el inducido.
2. Transporte y distribución de Energía Eléctrica. Tiene por objeto el estudio de la red de distribución cuya función principal es la transmisión de energía eléctrica desde las redes de transporte hasta los puntos de consumo
3. Flujos de carga. Mediante la resolución del problema del flujo de carga de un sistema eléctrico se obtienen las condiciones de operación
4. Introducción al mercado Ibérico de la electricidad. Se describen los mecanismos que se utilizan para negociar y ejecutar la compra - venta de energía eléctrica.

Los tres primeros temas forman un bloque que permite al estudiante tener una idea completa, de la complejidad técnica que supone disponer de energía eléctrica de calidad en los diferentes puntos de consumo de una red eléctrica.

El último tema tiene por objeto describir el actual mercado de energía eléctrica, desgranándose cada uno de los términos que dan lugar al precio final del kWh pagado por los consumidores.

Valencia noviembre de 2018



# 1. Generación de energía eléctrica: introducción al generador síncrono

## 1.1. Principios de funcionamiento

Dentro de los convertidores electromecánicos, las máquinas síncronas, (MS), son aquellas en las que para que se produzca conversión de energía en cualquiera de los dos sentidos, es decir, para que el funcionamiento sea como motor o generador, es imprescindible que en régimen permanente la velocidad de giro sea igual a la velocidad de sincronismo ( $n_s$ ), es decir, a la velocidad del campo giratorio generado por la corriente del inducido de la máquina. En este apartado, se va a comentar el principio de funcionamiento de las máquinas síncronas como generador o motor, partiendo de una máquina eléctrica elemental.

### 1.1.1 *Funcionamiento de la máquina rotativa elemental (m.e.r.) como máquina síncrona*

#### 1.1.1.1 Funcionamiento como generador

La Figura 1.1.A. Máquina rotativa elemental.a muestra una máquina eléctrica rotativa (m.e.r.) elemental bipolar, con dos polos formados por imanes en el estator, una espira diametral colocada en el rotor cilíndrico de material magnético de alta permeabilidad, y unida a dos anillos colocados sobre el eje. Al hacer girar el rotor a una velocidad constante, como muestra la Figura 1.1.A. Máquina rotativa elemental, se obtiene entre los anillos una f.e.m. inducida. (Figura 1.1.A. Máquina rotativa elemental.b y c).

Si el rotor gira a  $n_1$  vueltas por minuto (r.p.m.), la frecuencia  $f_2$  de la f.e.m generada en la espira vale:

$$f_2 = \frac{p_1 n_1}{60} \quad (\text{eq. 1.1})$$

Siendo  $p_1$  el número de pares de polos de la máquina (en el ejemplo de la Figura 1.1.A. Máquina rotativa elemental,  $p_1$  sería igual a 1).

De acuerdo con el teorema de la semejanza, la forma de onda de la f.e.m. en el tiempo se corresponderá con la forma de onda espacial de tensión magnética en el entrehierro de la máquina.

A partir de la (eq. 1.1) se observa que si se quiere mantener constante la frecuencia que da la máquina, se debe hacer girar el rotor a una velocidad también constante ya que  $p$  es invariable en la máquina. De aquí el nombre de

Máquina Síncrona (M S). Su utilización fundamental es como generador que ha de proporcionar una tensión alterna, senoidal a frecuencia constante.

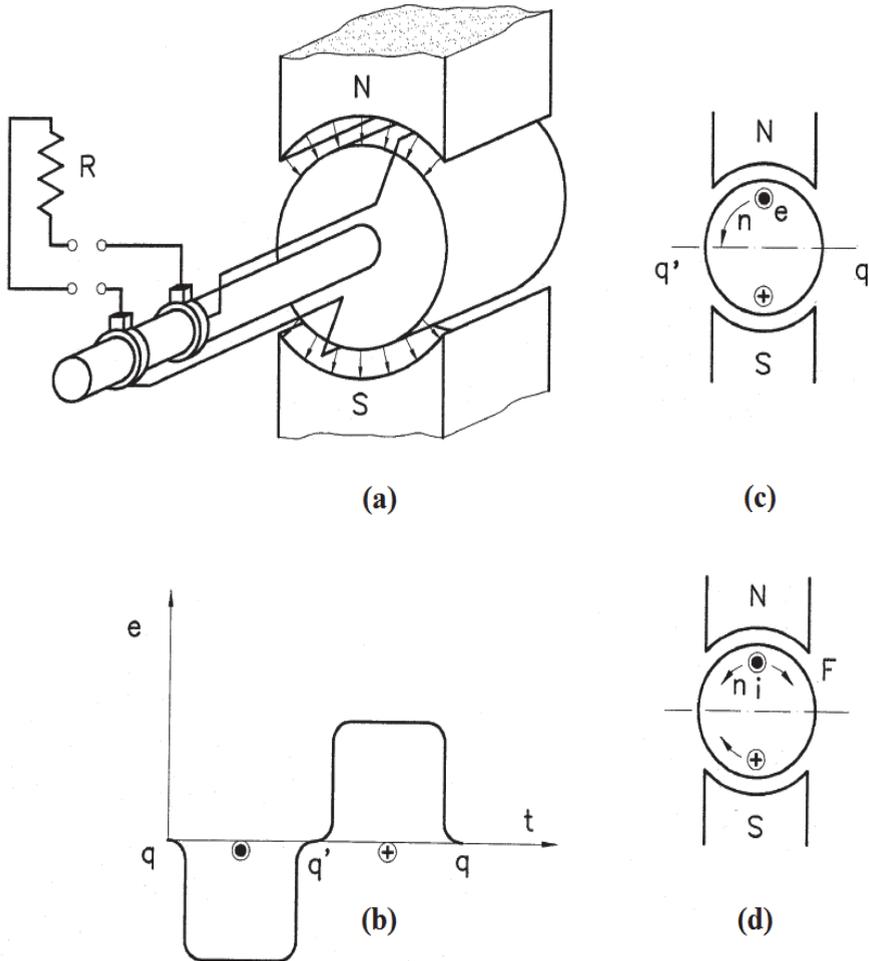


Figura 1.1. A. Máquina rotativa elemental.

Obsérvese que si se coloca una carga resistiva en bornes de la máquina elemental, (la conexión se hace con dos delgas fijas de carbón especial que frotan sobre los anillos) la corriente generada  $i=e/r$  estará en fase con la f.e.m.

(e) y el par mecánico producido tiene un sentido contrario al del movimiento del rotor ya que la máquina produce un par resistente, (Figura 1.1.A. Máquina rotativa elemental.d). Para ver los sentidos de las fuerzas electromotrices (f.e.m) generadas y las fuerzas mecánicas se aplican respectivamente las conocidas reglas nemotécnicas de la mano derecha e izquierda.

En las figuras 1.1.A. c y d los puntos representan f.e.m o corrientes salientes y las cruces sentidos entrantes.

### 1.1.1.2 Funcionamiento como motor

Siguiendo con la máquina de la Figura 1.1.A Máquina rotativa elemental, si se quiere que funcione como motor, se debe inyectar corriente alterna a la espi-ra por medio de las delgas. Para que la fuerza ejercida sobre el conductor mantenga su sentido, la corriente de cada uno de los conductores del rotor debe cambiar de sentido cada vez que el conductor recorre un paso polar, es decir, cada vez que un conductor pasa de estar bajo un polo Norte a un polo Sur, la corriente debe de cambiar de sentido. La condición anterior puede observarse en la máquina elemental de la Figura 1.1.B, de 8 polos y con una bobina elemental (a-á) que abarca 90° eléctricos. En esta figura, los “puntos” (·) y “cruces” (x) representan corrientes, y darán lugar a fuerzas que hacen girar a la máquina según la flecha.

Así pues, si la frecuencia de las corrientes del rotor es  $f_2$ , la velocidad de giro del rotor en r.p.m. ha de ser:

$$n_s = \frac{60f_2}{p} \quad (\text{eq. 1.2})$$

por lo tanto, si la frecuencia de alimentación es constante, la velocidad de giro ha de serlo también.

La (eq. 1.2) se deduce fácilmente considerando que el tiempo en segundos empleado por el conductor (a) en recorrer un paso polar:

$$t = \frac{1}{n_s/60} \cdot \frac{1}{2p} \quad (\text{eq. 1.3})$$

ha de ser igual a un semiperiodo o tiempo empleado en producirse una inversión del sentido de la corriente.

$$t = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{f_2} \quad (\text{eq. 1.4})$$

De las (eq. 1.3) y (eq. 1.4), se obtiene la (eq. 1.2).

En la deducción anterior, se ha supuesto que durante todo el recorrido de un conductor, bajo un paso polar, la corriente tiene el mismo sentido. El proceso deductivo no cambia si se supone que durante el recorrido del conductor bajo un paso polar, la corriente lleva un sentido que durante un tramo es punto (·) y el sentido contrario, cruz (x), durante el resto del recorrido bajo el mismo paso polar. El sentido de la fuerza cambiará durante el recorrido del conductor en el paso polar, pero habrá una fuerza media resultante siempre que la longitud de los tramos “punto” y “cruz” se mantenga en cada paso polar. La máquina está en sincronismo, lo que ha variado ha sido la fase de la corriente respecto a la f.e.m inducida en el devanado. Por el contrario, si los tramos “punto” y “cruz” varían en longitud en cada ciclo, quiere decir que la máquina no está en sincronismo y la fuerza media tras un gran número de ciclos es cero.

Es evidente que la fuerza máxima o par máximo se tiene cuando el sentido de la corriente no cambia durante el recorrido de un paso polar.

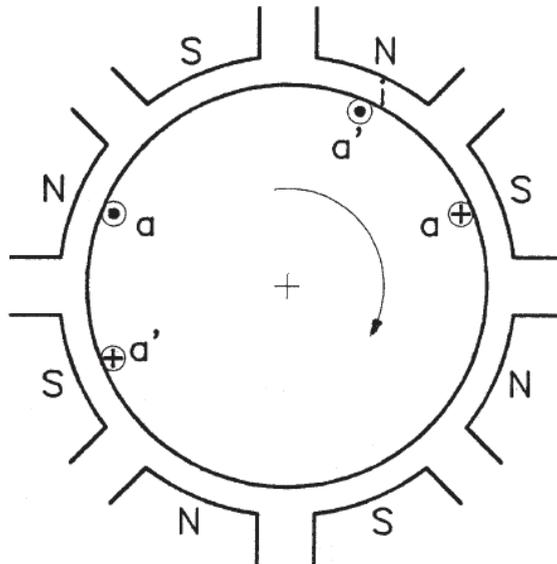


Figura 1.1.B. Máquina síncrona elemental de 8 polos.

### 1.1.2 Principios de funcionamiento de una máquina síncrona real

La mayoría de las máquinas síncronas utilizadas industrialmente adoptan una disposición diferente a la máquina eléctrica elemental. En ellas, los polos (inductores) se colocan en el rotor y el inducido en el estator, que está devanado de forma conceptualmente idéntica al de una máquina asíncrona, con las tres fases cuyos ejes están desfasados entre sí  $120^\circ$  eléctricos.

La Figura 1.2 representa esquemáticamente una máquina síncrona trifásica con una sola bobina por fase, alojada en dos ranuras con paso diametral o bien una máquina síncrona “real” en la que las bobinas (aa’), (bb’), (cc’) representan las bobinas eléctricamente equivalentes a los devanados distribuidos de cada una de las fases, según definición del libro “Serrano Iribarnegaray L. 1989 *Fundamentos de máquinas eléctricas*. Barcelona. Marcombo”

Aunque se cambie la posición del inducido (estator) e inductor (rotor), la (eq. 1.1) sigue siendo válida, siendo  $n_1$  y  $p_1$  la velocidad y número de pares de polos del rotor y  $f_2$  la frecuencia generada en el inducido.

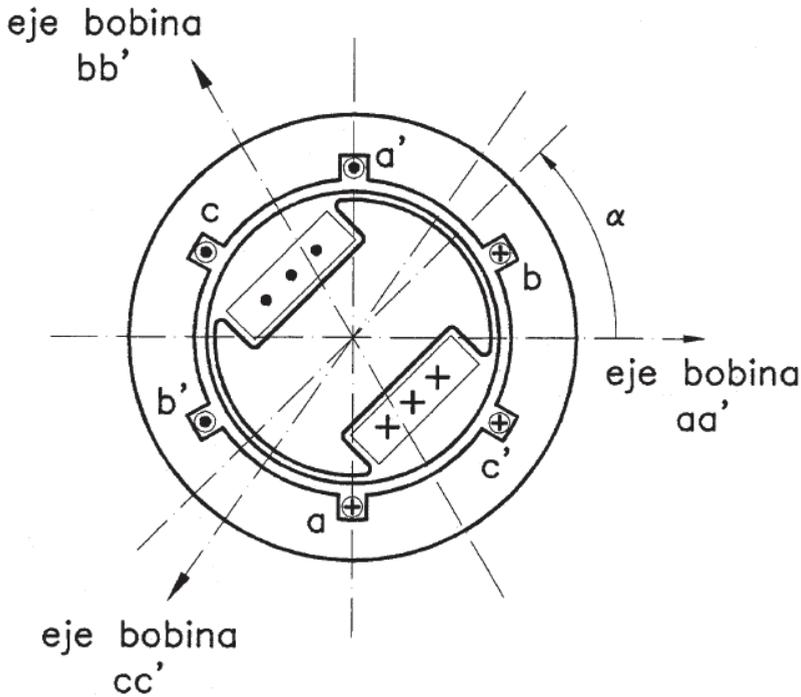


Figura 1.2 Corte transversal máquina síncrona trifásica.

### 1.1.2.1 Funcionamiento como generador

Se considera la máquina de la Figura 1.2, con origen de ángulos en el eje de  $aa'$ , tal que el eje polar forma un ángulo  $a = \Omega_1 t$  con el eje  $aa'$ . Se toma  $t=0$  cuando  $a = 0$ .

Considerando una distribución del campo magnético ( $B$ ) en el entrehierro senoidal, (Figura 1.3), el flujo por polo total que concatena una bobina ( $aa'$ ) para una posición  $a$ , del inductor es:

$$\psi_{aa} = \psi_0 \cos a = \psi_0 \cos(\Omega_1 t) \quad \text{con} \quad \Omega_1 = 2\pi f = \frac{2\pi n p}{60} \quad (\text{eq. 1.5})$$

en donde  $\psi_0$  es el flujo máximo concatenado por la bobina o fase, si se ha reducido la fase a su bobina equivalente.

En la (eq. 1.5) y para una máquina ideal (entrehierro uniforme, sin ranuras), con 2 pares de polos, se cumple:

$$\psi_0 = \frac{B_M l D}{p} \quad \text{con} \quad B_a = B_M \cos a \quad \text{y} \quad B_a = F_a \frac{\mu_0}{\delta} \quad (\text{eq. 1.6})$$

$B_M$  se tiene para  $a = 0$ .

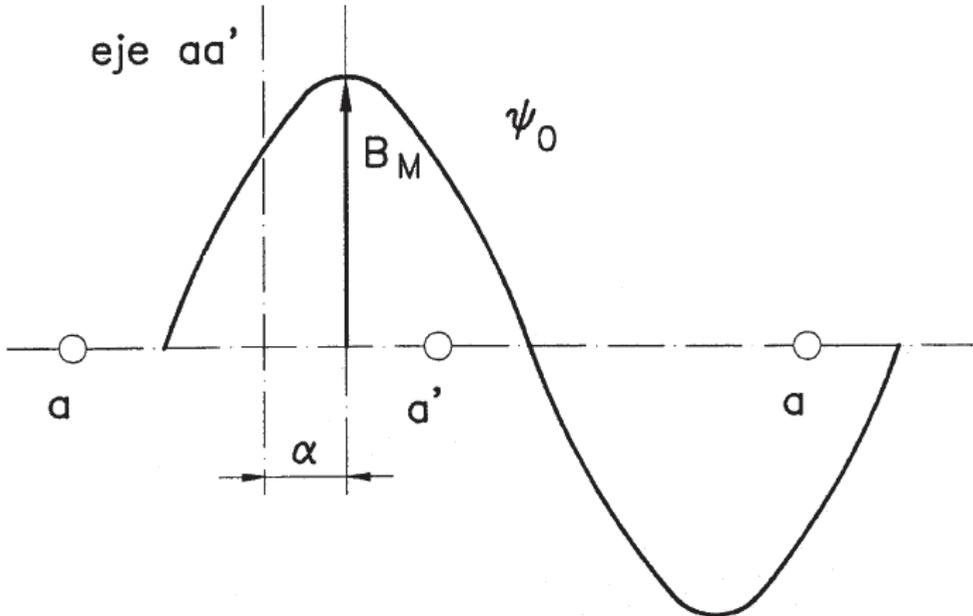


Figura 1.3 Onda de campo magnético en el entrehierro.

La justificación de estas expresiones se puede encontrar en el libro “Máquinas Eléctricas” de Luis Serrano y Javier Martínez (Serrano Iribarnegaray L. Martínez Román J.A. 2017 [4ªed] Máquinas Eléctricas. Valencia. Ed. Universitat Politècnica de València.).

Nótese que  $\alpha$  es el desfase medido en ángulos eléctricos. A partir de aquí y en el resto del desarrollo, los ángulos que se toman son ángulos eléctricos, haciendo abstracción del número de polos.  $\Omega_1$  se expresa en radianes eléctricos por segundo.

La fuerza electromotriz inducida en esta bobina, es por tanto:

$$e_a = \frac{-\partial \Psi_a}{\partial t} = \sqrt{2} E_0 \sin(\Omega_1 t) = \sqrt{2} E_0 \cos(\Omega_1 t - \pi/2) \quad (\text{eq. 1.7})$$

y en donde  $E_0$ , toma el valor eficaz:

$$E_0 = 4,44 \xi_2 f_2 N \Phi_0 \quad (\text{eq. 1.8})$$

Análogamente, en las otras dos bobinas, decaladas  $120^\circ$ , se tiene

$$\begin{aligned} \Psi_{ab} &= \Psi_0 \cos(\Omega_1 t - \pi/3) \\ \Psi_{ac} &= \Psi_0 \cos(\Omega_1 t - 2\pi/3) \end{aligned} \quad (\text{eq. 1.9})$$

y las f.e.m. correspondientes son:

$$\begin{aligned} e_b &= \sqrt{2} E_0 \cos(\Omega_1 t - \pi/3 - \pi/2) \\ e_c &= \sqrt{2} E_0 \cos(\Omega_1 t - 2\pi/3 - \pi/2) \end{aligned} \quad (\text{eq. 1.10})$$

Así pues, en bornes del generador, un sistema trifásico equilibrado de f.e.m. Si se conecta una carga trifásica equilibrada, se presenta un sistema trifásico equilibrado de corrientes que da lugar a un campo giratorio a una velocidad en r.p.m. de:

$$n_2 = \frac{60 f_2}{p_2} \quad (\text{eq. 1.11})$$

Donde  $f_2$  es la frecuencia de las f.e.m. y corrientes del inducido (estator) y  $p_2$  es el número de pares de polos del inducido.

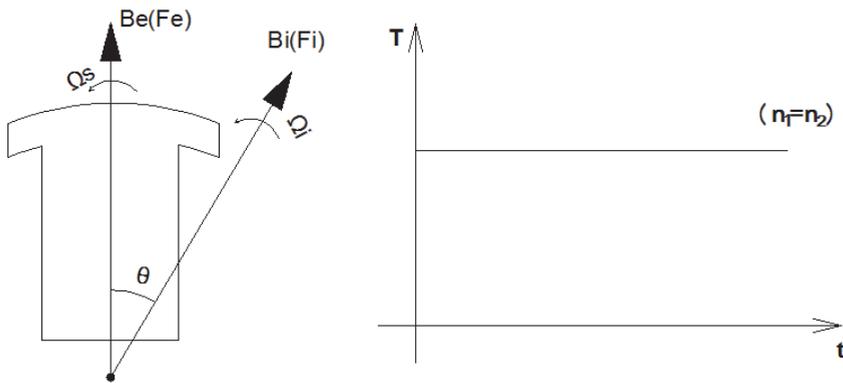
Como la frecuencia  $f_2$  depende del número de pares de polos del rotor ( $p_1$ ) y de su velocidad ( $n_1$ ) según la (eq. 1.1), para que la velocidad del campo giratorio ( $n_2$ ) sea igual a la velocidad del rotor ( $n_1$ ) es imprescindible que el número de pares de polos del inducido ( $p_2$ ) sea igual al del inductor ( $p_1$ ) ( $p_1 = p_2$ ).

Esto último se puede ver fácilmente si en la (eq. 1.11) se sustituye  $f_2$  por su valor:

$$n_2 = \frac{60f_2}{p_2} = \frac{60}{p_2} \cdot \frac{p_1 n_1}{60} = n_1 \quad ; \quad \text{si } p_1 = p_2 \quad (\text{eq. 1.12})$$

A partir de aquí, en el texto, a la velocidad  $n_1 = n_2$  se le denomina velocidad de sincronismo ( $n_s$ ).

En las condiciones anteriores citadas, el ángulo que forman los fasores espaciales de inducción de estator y rotor ( $B_e$  y  $B_r$ ), es constante y el par electromagnético interno ( $T_e$ ) instantáneo en régimen permanente, también lo será:



$$T_e = K(B_e \times B_r) = K B_e B_r \text{ sen}(\theta) \quad (\text{eq. 1.13})$$

Figura 1.4. Par electromagnético.

Este par electromagnético tiene el carácter de par resistente, igual y opuesto al par motor mecánico producido por la turbina o cualquier otro sistema que accione al alternador.

**Nota:** En todo el razonamiento de este apartado se ha considerado, de forma ideal, la onda de inducción senoidal y, por tanto, solo aparecen componentes fundamentales de  $B$ .

### 1.1.2.2 Funcionamiento como motor

Se va a analizar el comportamiento como motor de una máquina síncrona de la Figura 1.2. Supóngase que la máquina está parada y se pretende arrancar, para ello el devanado trifásico del estator es alimentado por un sistema de tensiones senoidales equilibradas, por lo que dan lugar a un campo magnético giratorio ( $B_i$ ) a una velocidad que depende de la frecuencia de la tensión de alimentación (eq. 1.11).

Por otro lado, los polos del rotor crean, mediante imanes o bobinas alimentadas con corriente continua, un campo magnético senoidal ( $B_e$ ) fijo en el espacio (Figura 1.5).

Así pues se tiene un campo magnético senoidal fijo en el espacio ( $B_e$ ,  $n_1=0$ ) y uno giratorio ( $B_i$ ) a una velocidad  $n_2$ .

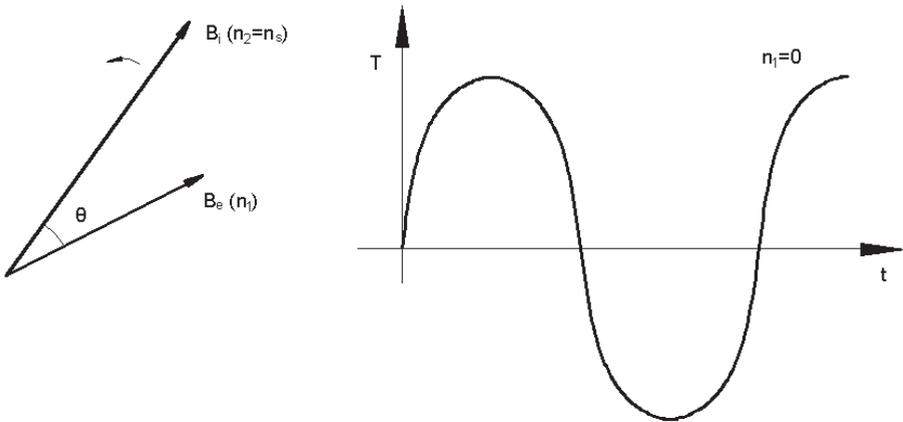


Figura 1.5. Par electromagnético

Según la (eq. 1.13) se tiene un par electromagnético, cuya magnitud varía con el tiempo entre  $0$  y  $2\pi$  a la frecuencia de la red de alimentación. Por lo tanto, el par varía periódicamente tomando valores positivos y negativos y su valor medio es cero (Figura 1.5). En estas condiciones la máquina no puede comenzar a girar.

Solamente si el rotor, y por lo tanto el campo magnético que producen sus polos, gira a la misma velocidad que el campo magnético del estator, se

producirá un par medio distinto de cero y además constante. En estas condiciones si podrá funcionar la máquina como motor.

Esta propiedad que tienen las máquinas síncronas de dar par medio no nulo, únicamente a la velocidad de sincronismo y por lo tanto la imposibilidad de arrancar por sí mismas, además de otras consideraciones, ha hecho que su empleo como motor esté muy limitado respecto a las máquinas asíncronas. Así pues, para poder funcionar la máquina síncrona como motor, habrá que dotarla de algún sistema de arranque capaz de llevarla hasta la velocidad de régimen. Esta velocidad es la de sincronismo y viene impuesta por la frecuencia de la tensión de alimentación del estator y del número de pares de polos (idénticos en el estator y el rotor) según la (eq. 1.12).

## 1.2. Constitución de las máquinas síncronas

### 1.2.1 *Composición*

Los elementos básicos de una máquina síncrona son el **devanado inducido** de corriente alterna y el **inductor** alimentado por corriente continua. Además, estas máquinas suelen llevar un devanado adicional denominado **devanado amortiguador**. Para producir la corriente continua que alimenta al inductor, la mayoría de las máquinas síncronas disponen de un **sistema de excitación**.

Además, debido a las potencias y tamaños que alcanzan estas máquinas en su utilización como generador, se han desarrollado **sistemas de refrigeración** específicos para ellas.

#### 1.2.1.1 Devanado inducido

Normalmente es un devanado trifásico equilibrado, distribuido en  $60^\circ$  eléctricos de doble o simple capa. En la mayor parte de las máquinas está alojado en el estator. Conceptualmente es como un devanado estatórico de una máquina asíncrona, pero en las máquinas síncronas más grandes (de potencias superiores a las asíncronas) los devanados estatóricos presentan peculiaridades constructivas específicas, como pueden ser: conductores en forma de barras subdivididos en capas que modifican su posición a lo largo de la ranura (barras complejas o Roebel), barras huecas para facilitar la refrigeración, devanados con un determinado número de ranuras por polo y fase no entero (devanados fraccionarios) característicos de máquinas con gran número de polos, devanados de simple capa, etc.

Solamente en máquinas especiales y de poca potencia puede estar el inducido en el rotor.

Las ranuras donde va alojado el devanado inducido suelen ser rectangulares. Los estatores se construyen con chapas de silicio laminadas en caliente de 0,5 a 0,35 mm con cifras de pérdidas de 1,7 a 1 W/Kg a 1 Tesla. Algunas veces, para reducir pérdidas se colocan chapas de grano orientado.

### 1.2.1.2 Devanado inductor de excitación

Normalmente está situado en el rotor de la máquina. Es un devanado monofásico, distribuido o concentrado, alimentado por corriente continua a partir de un sistema de excitación que utiliza normalmente anillos rozantes. En máquinas pequeñas como servomotores, y en algunas especiales como algunos generadores eólicos, la excitación puede realizarse mediante imanes permanentes.

En este texto, salvo indicación en contrario, se considerará que la MS dispone de devanado de excitación.

Los **devanados distribuidos** se colocan en ranuras distribuidas normalmente en  $2/3$  del paso polar. Los rotores de estas máquinas son **cilíndricos** (Figura 1.6) muestra un ejemplo con  $2p = 2$ , a esta máquinas se les denomina Máquinas Síncronas de Rotor Cilíndrico (MSRC).

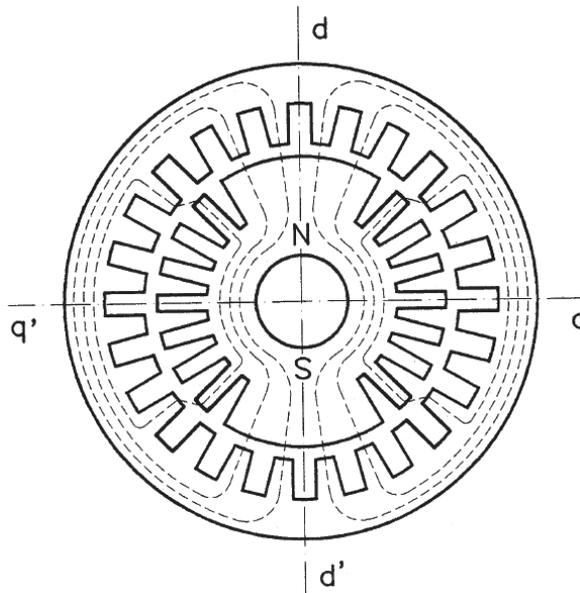


Figura 1.6. Máquina síncrona de rotor cilíndrico.

Los devanados concentrados se utilizan en máquinas con polos. La Figura 1.7 muestra el esquema de una máquina síncrona de polos salientes (MSPS), con  $2p = 4$ .

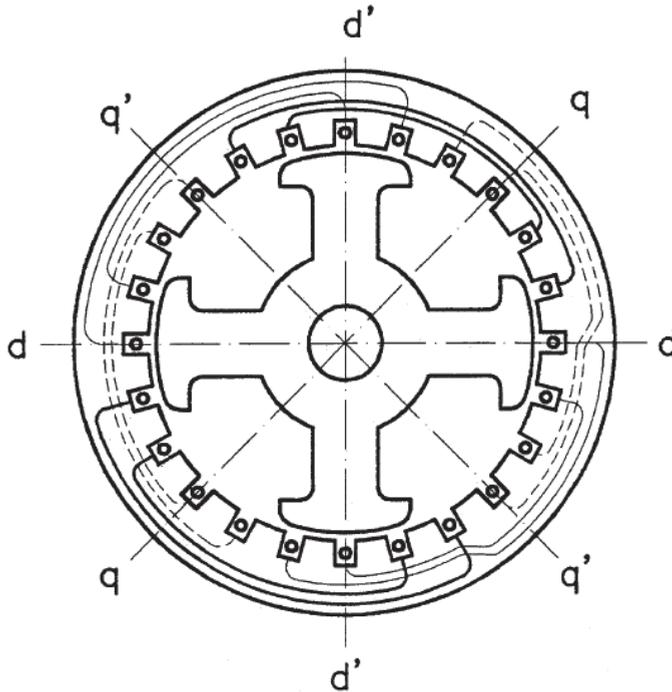


Figura 1.7 Máquina síncrona de polos salientes.

Para conseguir una onda de inducción en el entrehierro lo más senoidal posible, se hace que el perfil de los polos de lugar a una anchura de entrehierro variable. Así pues, se construyen polos con perfiles que dan lugar a una variación lineal o senoidal del entrehierro, y también con perfil circular pero de radio menor que el interior del estator, y centro no coincidente con el centro de la circunferencia del estator.

El inductor se sitúa en el rotor de las máquinas debido a que la potencia de excitación en continua es muy inferior a la potencia de la máquina (del orden del 0,5% o menos para grandes generadores). Con ello se disminuye el tamaño del rotor, además el número de anillos rozantes que se necesita es de dos y de dimensiones menores que las de los tres que se necesitarían en el caso de colocar el inducido en el rotor.

**Para seguir leyendo haga click aquí**