

# • CAPÍTULO 2 Conceptos básicos de máquinas eléctricas

## 2.1 INTRODUCCIÓN

Una máquina eléctrica es un dispositivo que transforma energía eléctrica en otro tipo de energía, o viceversa. Los tipos de energía en que se puede transformar la energía eléctrica son la energía cinética (máquinas rotatorias) o la energía potencial de los campos magnéticos (máquinas estáticas).

Las máquinas eléctricas estáticas son aquellas que no tienen partes móviles, tales como los transformadores, que son dispositivos que cambian el nivel de tensión (voltaje) de la energía eléctrica en corriente alterna, es decir, estos equipos conservan el tipo de energía (eléctrica) entre su entrada y su salida pero modifica sus propiedades. También se consideran máquinas eléctricas estáticas los inversores y los rectificadores, que son dispositivos encargados de transformar la energía eléctrica en corriente continua (DC) a corriente alterna (AC) y viceversa.

Las máquinas eléctricas rotatorias son aquellas que transforman energía eléctrica en energía mecánica, en cuyo caso se dice que la máquina corresponde a un motor, o la energía mecánica en energía eléctrica, en cuyo caso se dice que la máquina corresponde a un generador. Todas las máquinas rotatorias tienen una parte móvil que se denomina rotor y una parte fija que se denomina estator. Al espacio de aire que existe entre la parte fija y móvil

### **INVERSORES**

*Dispositivo que convierte las variables eléctricas en corriente continua (DC) en alternas (AC). Su utilidad radica en que el voltaje en los paneles fotovoltaicos y en las baterías es continuo, mientras que muchas veces es necesario suministrar cargas alternas.*

*Las principales características de un inversor son su tensión y potencia nominal, su capacidad de suministrar picos de potencia transitorios, su eficiencia, y la estabilidad de su tensión de salida.*

*La distorsión armónica de una idea de lo que se asemeja una onda a una senoide. Los inversores cuya salida es una onda cuadrada tienen una elevada distorsión armónica y son válidos únicamente para cargas resistivas. Los inversores de onda sinusoidal escalonada (escalones simulando una onda sinusoidal) pueden alimentar a algunos aparatos electrónicos, aunque para cargas electrónicas sensibles y motores se deben utilizar inversores de onda sinusoidal pura.*

*Además, en sistemas eléctricos aislados de la red el inversor debe ser capaz de funcionar en paralelo con otros generadores y sincronizar su onda de tensión con ellos. Estos inversores deben ser capaces también de generar la onda de tensión cuando ningún otro generador opera.*

de la máquina eléctrica se le denomina entrehierro, por estar las otras dos partes constituidas de este material.

## 2.2 CIRCUITOS MAGNÉTICOS

### 2.2.1 CAMPOS MAGNÉTICOS

Para entender el funcionamiento de una máquina eléctrica es necesario considerar la presencia de un campo magnético, imprescindible para realizar la conversión de la energía.

Existen materiales, como la magnetita, que naturalmente constituyen imanes permanentes naturales (atraen trozos de hierro). Estos materiales producen un campo de fuerzas (campo magnético) en su entorno. La variable que describe este campo es la densidad de flujo magnético ( $\vec{B}$ ), que es una variable vectorial cuya dirección es tangente a las líneas de campo magnético y cuya magnitud aumenta mientras mayor es la cantidad de líneas por unidad de área.

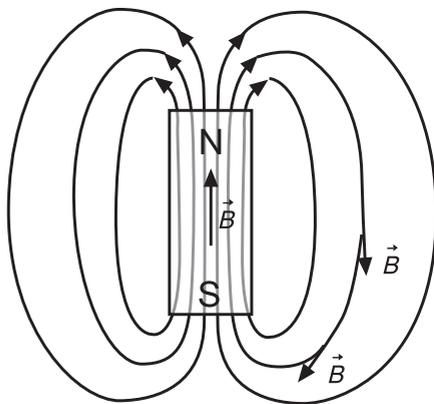


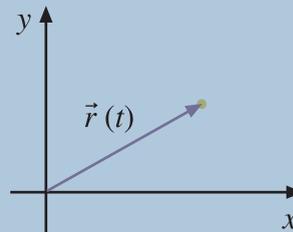
Ilustración 2.1:  
Campo magnético de un imán permanente.

La Ilustración 2.1 muestra el campo magnético de un imán permanente, notándose una mayor densidad de líneas

### RECTIFICADORES

Dispositivo que sirve para convertir la tensión alterna en continua. Existen rectificadores controlados que emplean tiristores y transistores, y no controlados, que emplean diodos. También existen convertidores bidireccionales AC/DC (inversor y rectificador integrados), algunos con regulación de carga de baterías. Las principales características de un rectificador son: la tensión y potencia nominal, y su eficiencia.

Una variable vectorial es aquella que se define por su magnitud, dirección y sentido. Suelen representarse como flechas en el plano cartesiano, cuyo largo corresponde a la magnitud y la ubicación de la punta de flecha indica el sentido. La variable  $\vec{r}(t)$  representa una variable vectorial en el plano cartesiano.



de campo magnético al interior del material. Además se puede observar la forma típica en que se cierran las líneas de campo magnético.

Se define el flujo magnético a través de una superficie  $S$  como:

$$\phi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

La unidad de medida de la densidad de flujo magnético ( $\vec{B}$ ) en el sistema MKS es el [Tesla] = [T] = [Wb / m<sup>2</sup>]. Para el

flujo magnético la unidad de medida es el [Weber] = [Wb].

Otra forma de producir un campo magnético es a través de una corriente eléctrica circulando por un conductor

tal como se muestra en la Ilustración 2.2 (a). En la Ilustración 2.2 (b) se observa la forma que toma el campo magnético al formar una bobina con el conductor. Esta configuración, llamada electroimán, es la más usada en máquinas eléctricas para producir campos magnéticos.

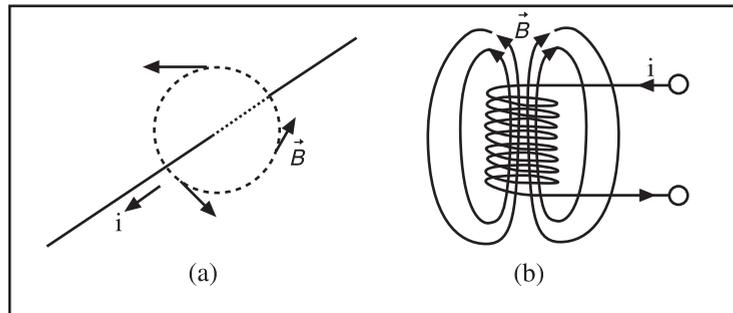


Ilustración 2.2: Campos magnéticos creados por corriente eléctrica.

### 2.2.2 LEY DE AMPERE

La ley de Ampere relaciona la densidad de corriente eléctrica  $\vec{J}$  y la densidad de flujo magnético creado por ésta ( $\vec{B}$ ), tal como se muestra a continuación:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \int_S \vec{J} \cdot d\vec{S}$$

La integral de la densidad de flujo se realiza sobre una trayectoria cerrada y plana, y la segunda integral sobre la superficie encerrada por la trayectoria recién mencionada. La constante  $\mu_0$  se denomina permeabilidad magnética del medio, que para materiales ferromagnéticos tiene un valor de  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} [H/m]$ . Si la corriente eléctrica se encuentra concentrada en un conductor unidimensional se puede escribir la ecuación anterior como:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \cdot i$$

Donde  $i$  es la corriente eléctrica total que atraviesa la trayectoria encerrada por  $d\vec{l}$ .

### 2.3 TRANSFORMADOR MONOFÁSICO

El transformador es una máquina eléctrica estática que opera en corriente alterna, recibiendo energía a un cierto nivel de tensión y corriente y entregándola a otro nivel de tensión y corriente. Todos los transformadores son fundamentales en los sistemas eléctricos de transmisión y distribución, donde es importante elevar el voltaje para transportar la energía eléctrica grandes distancias con pocas pérdidas.

#### 2.3.1 ASPECTOS CONSTRUCTIVOS

Las partes principales de un transformador son el núcleo ferromagnético y los enrollados. A medida que aumenta su potencia nominal, cuentan con una gran cantidad de accesorios que permiten su operación, instalación y mantenimiento seguros a través del tiempo.

El núcleo está formado, generalmente por láminas de acero silicoso. Este núcleo

laminado tiene por objetivo reducir las pérdidas por corrientes de Foucault. Por otro lado, los enrollados son conductores de cobre recubierto con aislación adecuada al nivel de tensión.

### 2.3.2 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

El transformador monofásico, es un dispositivo que consta, en su versión más simple, de dos o más enrollados enlazados por un flujo magnético mutuo a través de un núcleo de material ferromagnético, siendo capaz de generar tensiones inducidas a partir de la variación de los flujos que enlazan sus enrollados.

Uno de estos enrollados (primario) se conecta a una fuente de alimentación alterna  $v_1(t)$ , circulando por él una corriente alterna  $i_1(t)$  que genera un flujo variable en el tiempo  $\phi_1(t)$  cuya magnitud dependerá del voltaje aplicado y del número de espiras del primario (vueltas del conductor). Una parte de este flujo  $\phi_{m1}(t)$  enlaza al otro enrollado (secundario), induciendo en él una tensión también alterna  $v_2(t)$  cuya magnitud dependerá del número de espiras del mismo. Al inducirse esta tensión alterna, el enrollado secundario también genera un flujo magnético variable  $\phi_2(t)$ , siendo una parte del mismo enlazada por el primario  $\phi_{m2}(t)$  por lo que el resultado global del proceso es un flujo magnético alterno común que enlaza a ambos enrollados:

$$\phi_m(t) = \phi_{m1}(t) + \phi_{m2}(t)$$

Se utilizan núcleos de material ferromagnético, pues así el flujo queda confinado a un circuito bien definido y de alta permeabilidad que enlaza ambos enrollados, obteniéndose un mejor resultado que con un núcleo de aire. Por otro lado, una parte de los flujos

alternos inducidos en las bobinas salen del núcleo ferromagnético y por tanto, no enlazan sino al mismo enrollado que las produce. Estos flujos se conocen como flujos de fuga  $(\phi_{f1}(t), \phi_{f2}(t))$  y afectan el funcionamiento del transformador, el cual se presenta en la Ilustración 2.3.

#### **Ley de Inducción Electromagnética (Faraday-Lenz)**

*Establece que el voltaje inducido en un circuito eléctrico cerrado es directamente proporcional a la variación temporal del flujo magnético que atraviesa la superficie definida por dicho circuito. (Esta ley se presenta en detalle en la sección que explica el Principio de Funcionamiento básico del generador eléctrico).*

#### **PERMEABILIDAD MAGNÉTICA**

*Es la capacidad que tiene un material para hacer pasar a través de sí un campo magnético, la que se define por la relación entre la densidad de flujo magnético y la intensidad de campo magnético que aparece en el interior del material. Los materiales ferromagnéticos poseen valores de permeabilidad magnética muy grandes, y por ello se usan para confinar circuitos magnéticos, evitando al máximo los flujos de fuga. Se suele representar la permeabilidad como:*

$$\mu = \frac{|\vec{B}|}{|\vec{H}|}$$

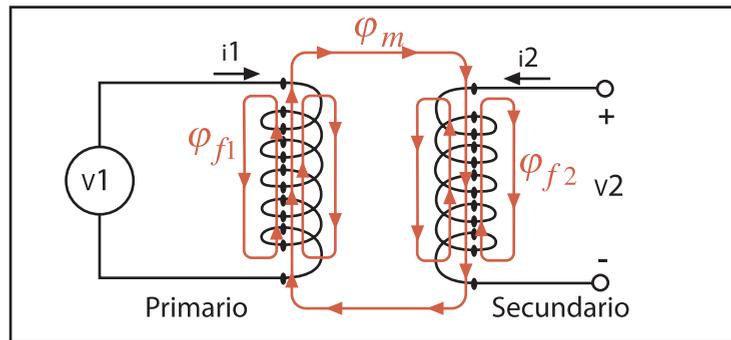


Ilustración 2.3: Principio de funcionamiento del transformador monofásico.

### 2.3.3 TRANSFORMADOR MONOFÁSICO IDEAL

Un transformador monofásico ideal es aquel en el cual no hay pérdidas de potencia ni fugas de flujo magnético (es decir, donde la permeabilidad del núcleo es infinita comparada con la del aire). Se supone, en lo que sigue, que el número de vueltas del enrollado primario es  $N_1$  mientras que el número de vueltas del enrollado secundario es  $N_2$ . En este caso el flujo  $\phi_m(t) = \phi(t)$  es enlazado totalmente por las  $N_1$  vueltas del primario y las  $N_2$  vueltas del secundario, cumpliéndose (de acuerdo a la Ley de Faraday-Lenz) que:

$$v_1(t) = N_1 \cdot \frac{d\phi}{dt} \quad \text{y} \quad v_2(t) = N_2 \cdot \frac{d\phi}{dt}$$

Es decir, se cumple que:

$$\frac{v_1(t)}{v_2(t)} = \frac{N_1}{N_2}$$

A la razón  $(N_1 / N_2)$  se le denomina usualmente “razón de transformación” y se designa con la letra  $a$ . Se observa, que cambiando el número de vueltas de

uno y otro enrollado se puede conseguir prácticamente cualquier relación entre las tensiones primaria y secundaria.

Por otro lado, de la conservación de la potencia se cumple que:

$$v_1(t) \cdot i_1(t) = v_2(t) \cdot i_2(t)$$

Con lo que, la relación para las corrientes será igual a:

$$\frac{i_1(t)}{i_2(t)} = \frac{N_2}{N_1}$$

Para la relación de corrientes anterior debe considerarse, que ésta es válida siempre que se cumpla que los flujos generados por las corrientes en los enrollados primario y secundario se resten, es decir, tienen sentidos opuestos, en cuyo caso se dice que el transformador tiene polaridad sustractiva (tal como se muestra en la Ilustración 2.4). En el caso en que las corrientes del primario y secundario generan flujos solidarios que se suman aparecerá un signo negativo en la relación para las corrientes y se dice que el transformador tiene polaridad aditiva (Ilustración 2.5).

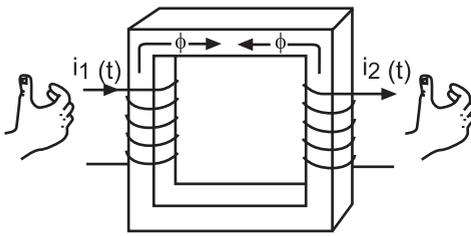


Ilustración 2.4:  
Transformador de polaridad sustractiva.

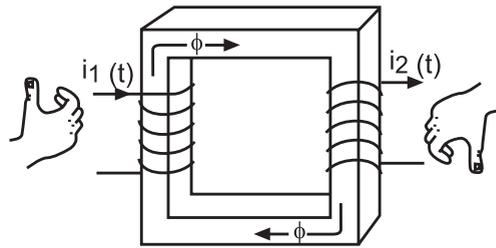


Ilustración 2.5:  
Transformador de polaridad aditiva.

Ambas polaridades se representan con dos puntos ubicados en posiciones diferentes en el secundario de acuerdo a si el transformador es de polaridad sustractiva o aditiva, tal como se muestra en la Ilustración 2.6:

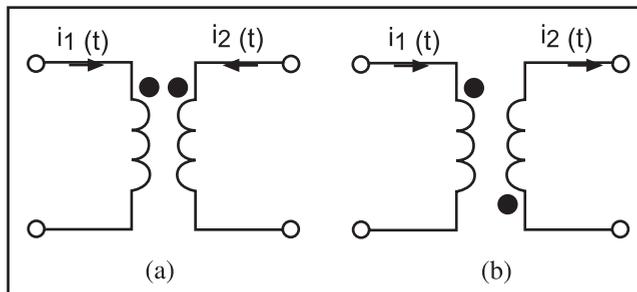
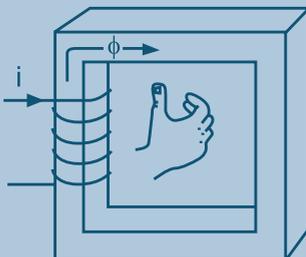


Ilustración 2.6: Marcas de polaridad en transformadores monofásicos.

### REGLA DE LA MANO DERECHA

Para entender el concepto de polaridad es necesario entender en qué dirección y sentido se producen las líneas de flujo magnético al circular una corriente eléctrica por una bobina. La dirección y el sentido de estas líneas vienen dados por el lugar hacia el cual apunta el pulgar de la mano derecha al hacer girar dicha mano en el sentido que lo hace la corriente eléctrica en el enrollado, tal como se muestra a continuación:



Además de lo anterior, debe considerarse que en la realidad los supuestos que se han planteado no se cumplen, por lo que es necesario cambiar las ecuaciones anteriores, ajustándolas a las pérdidas presentes en un transformador real.

### 2.3.4 TRANSFORMADOR MONOFÁSICO REAL – CIRCUITO EQUIVALENTE

El circuito equivalente (Ilustración 2.7) representa el comportamiento electromagnético del transformador considerando las pérdidas de potencia y flujos de fuga.

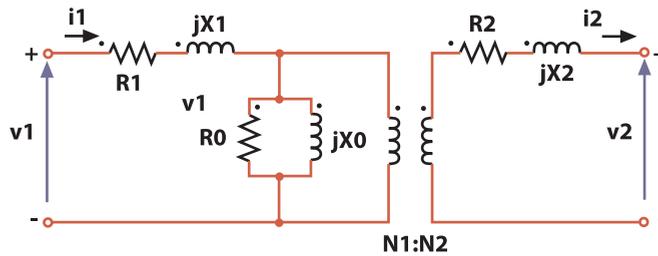


Ilustración 2.7: Circuito equivalente exacto del transformador monofásico.

Cada parámetro dentro del circuito equivalente representa un fenómeno del transformador real que lo aleja del modelo ideal.

- **Pérdidas en el Cobre:**

Estas pérdidas son proporcionales al cuadrado de la corriente que circula por los enrollados del transformador. Se deben a la resistencia en el enrollado primario ( $R_1$ ) y secundario ( $R_2$ ), las que se agregan al modelo del transformador.

- **Flujos de Fuga:**

Existen flujos de fuga que escapan del material ferromagnético, pues éste no tiene permeabilidad magnética infinita. Estos flujos sólo son enlazados por el enrollado que los produce y producen una autoinductancia en ellos. Este efecto se agrega al modelo mediante las reactancias de fuga  $X_1$  y  $X_2$ , para el primario y secundario respectivamente.

- **Pérdidas en el Núcleo de Fierro:**

Existen pérdidas por corrientes parásitas o de Foucault y pérdidas por histéresis en el núcleo ferromagnético. Todas estas pérdidas son proporcionales al cuadrado del voltaje aplicado al transformador, razón por la cual se incluyen en la rama en paralelo bajo la forma de la resistencia  $R_0$ .

- **Reactancia de Magnetización:**

Representa la componente de armónicas en la corriente de excitación y la componente en cuadratura. La primera

### CORRIENTE DE FOUCAULT

Los efectos electromagnéticos en las máquinas eléctricas producen tensiones inducidas en los núcleos ferromagnéticos de las mismas, las cuales redundan en la circulación de corrientes parásitas indeseadas por ellos, las cuales reciben el nombre de corrientes de Foucault.

### HISTÉRESIS

Es el fenómeno que se produce al someter el núcleo ferromagnético a un campo magnético creciente, en ese caso los dipolos magnéticos que los constituyen se orientan según el sentido del campo (de manera solidaria). Al disminuir el campo, la mayoría de los dipolos recobran su posición inicial, sin embargo, otros conservan en parte su orientación forzada por el campo magnético. Esto produce que quede una inducción magnética remanente incluso cuando desaparece el campo magnético externo al material, lo cual se traduce en pérdidas en el transformador.

se debe a la curva característica del núcleo con presencia de saturación. La segunda se debe al efecto propio de la corriente de magnetización, la cual es la encargada de generar la fuerza magnetomotriz para que circule el flujo magnético mutuo enlazado por ambos enrollados. Ambos fenómenos se presentan mediante la reactancia de magnetización  $X_0$ , en paralelo con la resistencia  $R_0$ .

### 2.3.5 CONTENIDO ARMÓNICO

La saturación magnética del núcleo de los transformadores se refiere a que aunque se aumente indefinidamente el flujo magnético, el aumento de la corriente de magnetización es cada vez menor. Esto tiene efectos sobre la forma de onda

de la corriente de excitación en vacío, ya que, aunque el flujo magnético  $\phi$  varíe sinusoidalmente, debido a la saturación (y también al ciclo de histéresis), la corriente de excitación no será puramente sinusoidal. La forma de onda del flujo y de la corriente de excitación se muestran en la Ilustración 2.8.

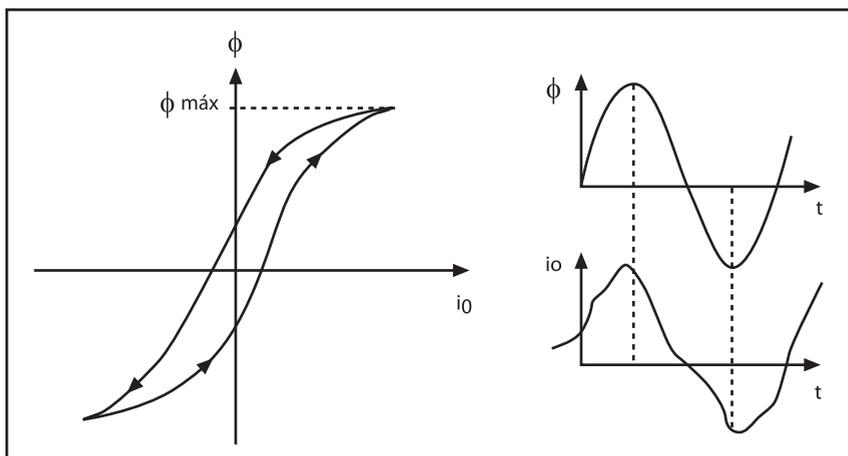


Ilustración 2.8: Formas de onda del flujo magnético y la corriente de excitación.

En la Ilustración 2.8 se puede observar que la forma de onda de la corriente no es sinusoidal debido a la variación no lineal de la corriente con el flujo magnético y tampoco es simétrica (debido al ciclo de histéresis). Es por ello que se dice que la forma de onda de la corriente es una suma de distintas formas de onda de frecuencia distinta, donde la frecuencia menor se denomina frecuencia fundamental y se denomina armónicas a todas las formas de onda con frecuencias múltiplos de dicha frecuencia fundamental.

Cuando el transformador no está en vacío, la corriente de excitación se superpone a las corrientes de línea hacia las cargas, por lo que el efecto de distorsión en la forma de onda de la corriente total

puede ser mayor o menor dependiendo de la magnitud de la corriente de carga y de la distorsión que las propias cargas introducen en la forma de onda. Muchas veces, los efectos de las armónicas pueden despreciarse, puesto que la corriente de excitación de un transformador de poder típico es del orden del 5% de la corriente de plena carga. En consecuencia, los efectos de las armónicas normalmente desaparecen frente a la presencia de las corrientes sinusoidales que circulan a través de los elementos lineales del circuito. Cobra relevancia entonces, la determinación del contenido armónico de una forma de onda. Uno de los muchos índices de calidad es el THD (total harmonic distortion):

$$THD = \frac{\sum (Potencia\ de\ los\ armóni\ cos)}{Potencia\ Total} = \frac{P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_N}{P_0 + P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_N}$$

Donde  $P_0$  es la potencia de la componente fundamental y  $P_i$  con  $i > 0$  es la potencia de la armónica  $i$ -ésima que contiene la señal. Este valor debe ser muy pequeño para formas de onda que se suponen deben ser sinusoidales.

La aparición de corrientes no sinusoidales origina, consecuentemente, la existencia de tensiones no sinusoidales en distintos puntos del sistema eléctrico, los cuales finalmente pueden ocasionar la disminución de la vida útil de los equipos de potencia, y la disminución de su eficiencia y desempeño, como por ejemplo, distorsión en la operación de controles electrónicos, vibraciones y ruido en equipos electromagnéticos, torques mecánicos pulsantes en máquinas rotatorias, operación incorrecta de sistemas de protección, calentamiento y pérdidas adicionales en máquinas, transformadores y condensadores, calentamiento de conductores, entre otras.

## 2.4 SISTEMA TRIFÁSICO

Un sistema trifásico de corrientes es el conjunto de tres conductores que transportan corrientes alternas monofásicas de igual frecuencia y amplitud, presentando un desfase entre ellas de unos  $120^\circ$  en el tiempo. Cada una de las corrientes monofásicas que forman el sistema se designa con el nombre de fase. En los sistemas eléctricos, típicamente las líneas de media y baja tensión de las redes de distribución urbanas son trifásicas, mientras que el empalme domiciliario y las redes al interior del hogar son monofásicas.

Un sistema trifásico de tensiones se dice que es equilibrado cuando sus corrientes son iguales y están desfasados simétricamente. Cuando alguna de las condiciones anteriores no se cumple, el sistema se dice desequilibrado o desbalanceado. En un sistema trifásico

equilibrado se cumple que la potencia trifásica total entregada a la carga trifásica, es igual a tres veces la potencia entregada a cada fase y carga monofásica (idénticas) vistas como un sistema monofásico, es decir:

$$S_{3\phi} = 3 \cdot S_{1\phi}$$

Y también se cumple que:

$$S_{3\phi} = \sqrt{3} \cdot V_{ff} \cdot I_L = 3 \cdot V_{fn} \cdot I_L = 3 \cdot V_{ff} \cdot I_{\Delta}$$

Donde  $S_{3\phi}$  es la potencia aparente trifásica total consumida por la carga monofásica,  $V_{ff}$  es el voltaje entre fases en la carga,  $V_{fn}$  su voltaje fase-neutro,  $I_{\Delta}$  la corriente por la delta de la carga (en caso de estar conectada en delta) e  $I_L$  es la corriente de línea entre el transformador y la carga trifásica, valores todos iguales para cada fase.

Un sistema trifásico presenta una serie de ventajas sobre los sistemas monofásicos alternos y sobre la corriente continua, como son la economía de sus líneas de transporte de energía, pues para alimentar una carga de igual potencia eléctrica, las corrientes por los conductores son menores que las que se presentan en un sistema monofásico. Además existe un elevado rendimiento en transformadores y motores trifásicos.

Debido a lo anterior, prácticamente toda la energía eléctrica en el mundo es generada y transmitida por intermedio de líneas de transmisión trifásicas, y demás, suele ocurrir que sea necesario subir o bajar varias veces la tensión entre los generadores y las cargas.

## 2.5 TRANSFORMADOR TRIFÁSICO

### 2.5.1 INTRODUCCIÓN

La función básica de los transformadores en circuitos trifásicos es cambiar el nivel de las tensiones (y corrientes) del sistema trifásico. Reciben energía a un cierto nivel de tensión y corriente, y la entregan a otro nivel de tensión y corriente, con pocas pérdidas, y con posible introducción de desfases entre las variables eléctricas.

El principio de funcionamiento de un transformador trifásico es idéntico al de un transformador monofásico. En el caso del transformador trifásico se puede considerar que existen tres pares de enrollados, dos por cada fase, donde cada par actúa como un transformador monofásico, considerando, luego de ver el tipo de conexión y la polaridad, los desfases angulares introducidos por el transformador trifásico.

Los transformadores trifásicos se caracterizan mediante su potencia trifásica ( $S_{3\phi}$ ) y su voltaje entre fases ( $V_{ff}$ ), más particularmente por la razón entre sus voltajes entre fase del primario y secundario, es decir, por la razón  $V_{ff1} / V_{ff2}$ .

### 2.5.2 CONEXIONES DE UN TRANSFORMADOR TRIFÁSICO

Los transformadores en conexión trifásica pueden estar constituidos por bancos trifásicos de unidades monofásicas, sin uniones magnéticas entre ellos, o bien por transformadores monofásicos propiamente tal, con un núcleo en el cual las tres fases están interconectadas magnéticamente. En cualquiera de los dos casos anteriores, se conecta cada primario a cada una de las fases del sistema de alimentación de modo que en los secundarios se obtenga el sistema trifásico a otro nivel de voltaje.

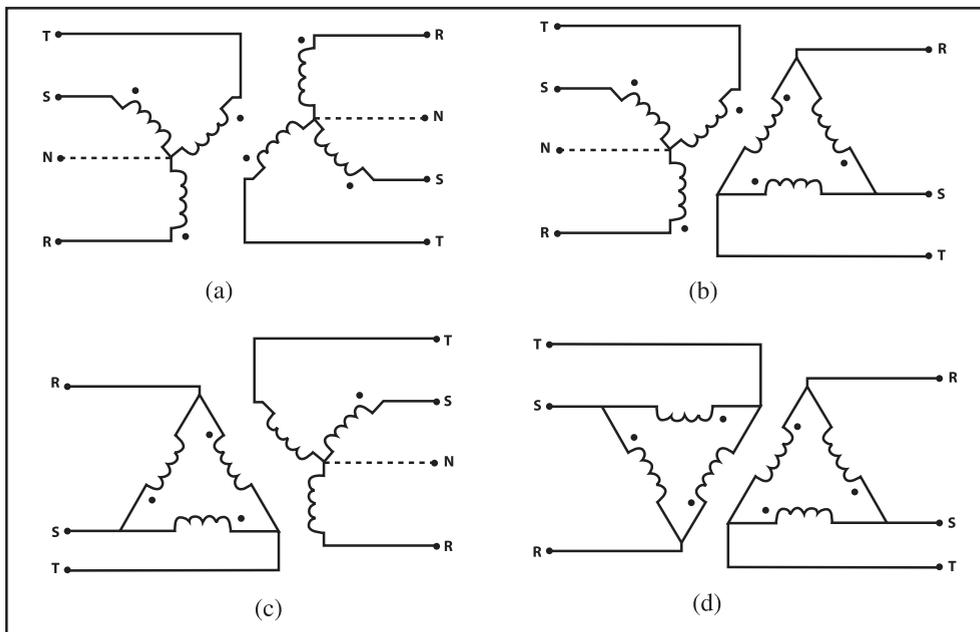


Ilustración 2.9: Tipos de conexión de un transformador trifásico: (a) Conexión Y-Y. (b) Conexión Y-Δ. (c) Conexión Δ-Y. (d) Conexión Δ-Δ.

Los tres bornes primarios se pueden conectar entre cada fase y el neutro del sistema en la llamada conexión estrella (Y), o entre fases en la llamada conexión delta ( $\Delta$ ). Del mismo modo los secundarios pueden entregar la potencia a la carga conectados ya sea en estrella o en delta. Así, es posible tener cuatro tipos de conexión básicos: YY, Y $\Delta$ ,  $\Delta$ Y y  $\Delta\Delta$ , donde el primer símbolo corresponde al tipo de conexión en el primario y el segundo al tipo de conexión en el secundario.

Estos cuatro tipos básicos de conexión se muestran en la Ilustración 2.9.

a) CONEXIÓN YY (ESTRELLA-ESTRELLA):

En esta conexión cada enrollado primario se conecta entre una de las fases y el neutro de la red de alimentación. Del mismo modo, los secundarios se conectan en Y dando origen a las tres fases y un neutro en común. Lo anterior se muestra en la Ilustración 2.9 (a). Para altas tensiones (mayores a 30 [kV]), la conexión YY es usualmente preferible desde el punto de vista económico, sobre todo si la capacidad del transformador no es muy elevada. La tensión aplicada a cada enrollado es menor que la tensión entre fases de la línea, mientras que la corriente por cada enrollado es igual a la corriente de línea. Para las tensiones se cumple la ecuación siguiente (para secuencia positiva):

$$V_{fn} = \left( \frac{V_{ff}}{\sqrt{3}} \right)$$

Donde  $V_{fn}$  es el voltaje sobre cada enrollado, y  $V_{ff}$  es el voltaje entre fases de la red. La preferencia de esta conexión se debe a que los enrollados deben soportar sólo  $1/\sqrt{3}$  veces la tensión fase-fase, mientras que los niveles de corrientes de línea (a tensiones altas) son relativamente bajos.

En comparación con la conexión  $\Delta$  para igual servicio, a la conexión Y le corresponde una tensión más baja por devanado y por consiguiente una corriente más elevada. Esto involucra menor aislamiento y el empleo de secciones de conductor mayores, que dan rigidez a las bobinas y las protege mejor contra los esfuerzos mecánicos que se producen durante cortocircuitos.

El montaje en estrella permite además tener el neutro accesible para la alimentación de las redes de baja tensión, en servicios mixtos de luz y fuerza y, para la protección, por medio de la puesta a tierra en el lado de alta tensión.

b) CONEXIÓN  $\Delta\Delta$  (DELTA-DELTA):

Cada enrollado se conecta entre dos fases de la red de alimentación en el primario. Mientras que en el secundario los secundarios también se conectan en  $\Delta$  formando tres fases sin neutro, tal como se muestra en la Ilustración 2.9 (d).

Bajo esta conexión los voltajes aplicados a los enrollados son los voltajes fase-fase directamente, mientras que las corrientes por los enrollados son menores a las corrientes de línea, cumpliéndose que:

$$I_{\Delta} = \left( \frac{I_L}{\sqrt{3}} \right)$$

Donde  $I_{\Delta}$  corresponde a la corriente por los enrollados e  $I_L$  a la corriente de línea. Como los enrollados deben soportar tensiones entre fases, esta conexión se emplea con tensiones bajas en primario y secundario (típicamente menores a los 30 kV). En esas condiciones, las altas corrientes de línea se ven reducidas en un factor igual a  $1/\sqrt{3}$  por lo que esta situación resulta ser menos crítica para el calibre de los conductores.

c) CONEXIÓN  $Y\Delta$  (ESTRELLA-DELTA):

Esta conexión corresponde a una combinación de las conexiones anteriores, como se muestra en la Ilustración 2.9 (b). Junto con cambiar las razones de transformación entre primario y secundario, esta conexión introduce un desfase de  $30^\circ$  entre los voltajes fase-fase de primario y secundario, y también un desfase similar entre las respectivas corrientes de línea. La conexión  $Y\Delta$  se utiliza generalmente con la Y en alta tensión y la  $\Delta$  en baja tensión por las razones ya señaladas en las dos conexiones anteriores, es decir, es la configuración usual de transformadores reductores de tensión.

d) CONEXIÓN  $\Delta Y$  (DELTA- ESTRELLA):

Esta conexión, que se muestra en la Ilustración 2.9 (c) es análoga a la anterior, intercambiando primario y secundario. Se utiliza normalmente para elevar voltajes, es decir,  $\Delta$  en baja tensión e Y en alta tensión, sin embargo, una excepción la constituyen los transformadores de distribución (13 kV/380 V), los cuales utilizan conexión  $\Delta Y$  en lugar de  $\Delta\Delta$  ya que se requiere neutro secundario accesible en los consumos.

### 2.5.3 CONEXIÓN TÍPICA DE TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

La Ilustración 2.10 muestra la conexión típica de los transformadores trifásicos en un sistema eléctrico de potencia de acuerdo al nivel de tensión o la necesidad o no de neutro. Los generadores eléctricos, en general entregan voltajes inferiores a 30 kV, por lo que se requieren transformadores elevadores  $\Delta Y$  para la transmisión a larga distancia. La elevación de tensión se hace por tramos por lo que existen transformadores intermedios entre líneas de transmisión en conexión YY. Al llegar estas líneas a los centros de consumo, los voltajes deben reducirse a niveles propios de las líneas de distribución en media tensión, por lo que se usan transformadores reductores  $Y\Delta$  formando la red de distribución trifilar que se observa en los postes de media tensión. Finalmente, los ya mencionados transformadores de distribución ( $\Delta Y$ , pues necesitan de neutro en el consumo) entregan la tensión que se distribuye en 4 líneas a los consumidores en 220V (fase-neutro).

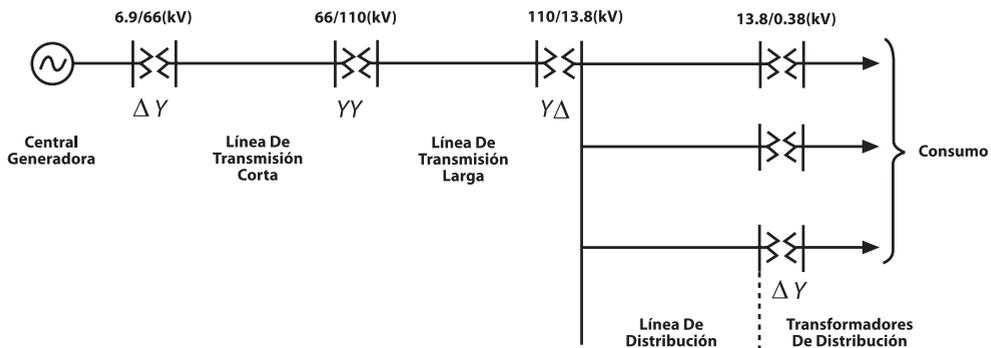


Ilustración 2.10: Conexión típica de transformadores trifásicos en sistemas eléctricos de potencia.

## 2.6 DISPOSITIVOS DE CONVERSIÓN ELECTROMEQUÍMICA

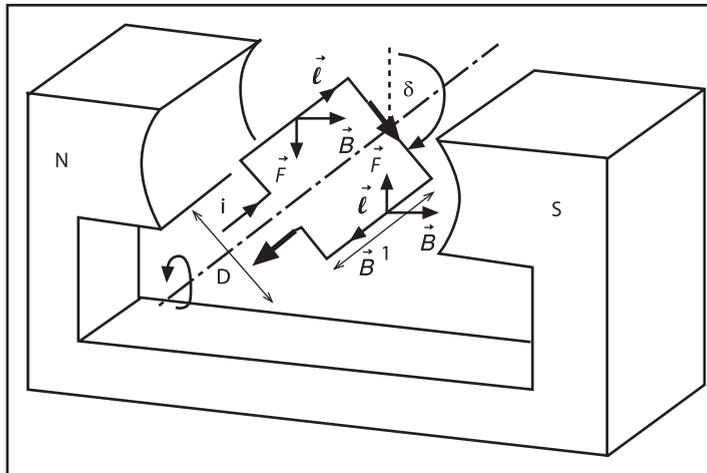
La conversión electromecánica de la energía comprende todos aquellos fenómenos relativos a la transformación de energía eléctrica en energía mecánica, y viceversa. Como ya se mencionó anteriormente, un motor es un dispositivo que convierte energía eléctrica en energía mecánica, mientras que un generador es aquél dispositivo que realiza el proceso inverso.

simple (de lado de largo  $\ell$ ) y plana, a través de la cual circula una corriente  $i$ . La espira es libre de girar sobre su eje y está ubicada en un campo magnético  $\vec{B}$  uniforme. Los lados axiales de la espira quedan entonces sometidos a una fuerza igual a:

$$|\vec{F}| = i \cdot \ell \cdot |\vec{B}|$$

Esta fuerza redonda en un torque motriz sobre el eje que genera el movimiento.

Ilustración 2.11: Motor elemental formado por una única espira.



### 2.6.1 PRINCIPIO BÁSICO DE FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR ELÉCTRICO

El principio básico de funcionamiento de cualquier motor eléctrico es que un campo magnético es un campo de fuerzas tal que, si se ubica en él un segundo conductor (independiente del conductor que genera el campo) por el cual circula una corriente eléctrica, éste queda sometido a una fuerza que, bajo ciertas condiciones, genera movimiento (energía mecánica).

Por ejemplo, en la Ilustración 2.11 se muestra un motor formado por una espira

### 2.6.2 PRINCIPIO BÁSICO DE FUNCIONAMIENTO DEL GENERADOR ELÉCTRICO

El principio básico de funcionamiento de cualquier generador eléctrico es la llamada Ley de Faraday-Lenz, la cual señala que en un conductor o circuito eléctrico que enlaza un flujo magnético variable en el tiempo, se induce una fuerza electromotriz (f.e.m.) o tensión inducida  $e(t)$  dada por:

$$e(t) = -\frac{d\phi(t)}{dt}$$

Esta tensión inducida hará circular entonces una corriente por el circuito en cuestión. La variación de  $\phi$  en el tiempo, puede producirse por una corriente variable en el tiempo (como ocurre en los transformadores) o por una variación en la geometría del sistema (como ocurre en los generadores donde la geometría varía de acuerdo al movimiento proporcionado mecánicamente). Por ejemplo, una espira sometida a un campo magnético constante

cuyo eje se encuentra velocidad angular, como se muestra en la Ilustración 2.12, enlaza un flujo de la forma:

$$\phi(t) = \phi_{m\acute{a}x} \cdot \cos(\delta) = \phi_{m\acute{a}x} \cdot \cos(\omega t)$$

Por lo que, de acuerdo a la Ley de Faraday-Lenz se producirá, en sus terminales, una tensión inducida igual a:

$$e(t) = E_{m\acute{a}x} \cdot \text{sen}(\omega t)$$

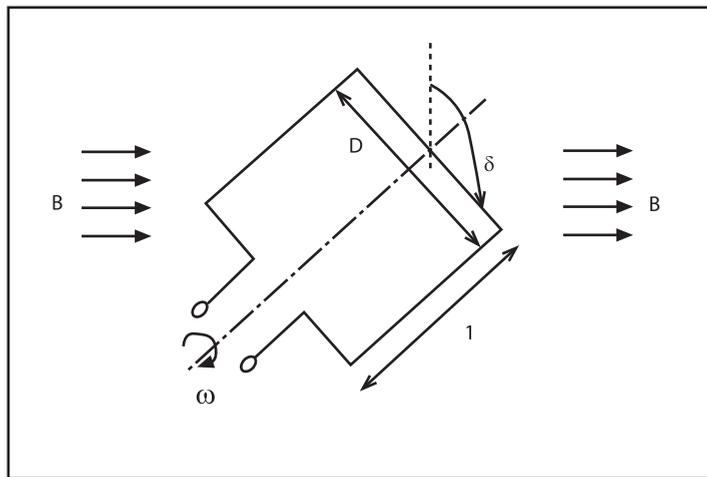


Ilustración 2.12: Generador elemental formado por una única espira.

Es decir, el dispositivo anterior corresponde a un generador de corriente alterna de frecuencia eléctrica  $\omega = 2\pi f$ .

## 2.7 MÁQUINA DE CORRIENTE CONTINUA

### 2.7.1 INTRODUCCIÓN

La máquina de corriente continua fue la primera de las máquinas rotatorias en ser desarrollada y no obstante las mejoras que han sido desarrolladas en su diseño, sigue siendo constructivamente más compleja que las máquinas de corriente alterna, pues necesita de una unión eléctrica entre rotor y estator, lo que la

hace comparativamente menos robusta, requiere mayor mantenimiento y a la vez tiene un mayor volumen y peso por unidad de potencia.

A pesar de lo anterior, esta máquina tiene múltiples aplicaciones, especialmente como motor, debido principalmente a:

- Amplio rango de velocidades, ajustables y controlables con alta precisión.
- Característica de torque-velocidad variable o constante.
- Rápida aceleración, desaceleración y cambio de sentido de giro.
- Posibilidad de frenado regenerativo (generación de energía eléctrica al frenar un motor).

## 2.7.2 CARACTERÍSTICAS CONSTRUCTIVAS

La máquina de corriente continua está formada principalmente de dos partes, el estator y el rotor, más las conexiones entre las mismas:

El estator es la parte fija de la máquina. Puede estar formado por un núcleo macizo o laminado. El flujo necesario en el entrehierro se logra distribuir en forma uniforme mediante los denominados polos, en los cuales se ubica el enrollado de campo o excitación de la máquina. El estator de la máquina de corriente continua se muestra en la Ilustración 2.13.

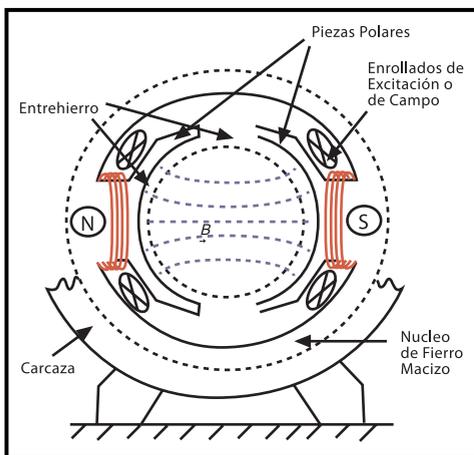


Ilustración 2.13: Estator de la máquina de corriente continua.

Muchas máquinas de corriente continua permiten conectar el campo ya sea en paralelo o en serie con la armadura, distinguiéndose entonces los enrollados serie y paralelo. El enrollado de campo paralelo (o shunt) es siempre un enrollado de muchas vueltas y poco calibre, ya que soporta, en general, una corriente pequeña y se conecta a la tensión de la máquina. Por el contrario, el enrollado de campo serie, está hecho con pocas vueltas de alambre de grueso calibre, ya que debe conducir

toda o una fracción no despreciable de la corriente de armadura.

También forman parte del estator, las escobillas o carbones, que son dispositivos que se encargan de tomar o transmitir la corriente en forma continua entre el rotor y el estator. Su contacto eléctrico con el rotor se realiza a través de las delgas del mismo. Finalmente, la estructura soportante se denomina carcasa y es donde se ubica el sistema de lubricación y la placa con los terminales de conexión

Por otro lado, el rotor está formado por un núcleo de hierro laminado para evitar pérdidas por corrientes parásitas y de Foucault. El enrollado del rotor (armadura) está formado por bobinas que se ubican en ranuras del rotor en torno al núcleo. Los terminales de las bobinas se conectan a las delgas, que en su conjunto forman el colector, donde hacen contacto rozante las escobillas o carbones, fijas al estator, permitiendo así la entrada o salida de corriente al enrollado de armadura.

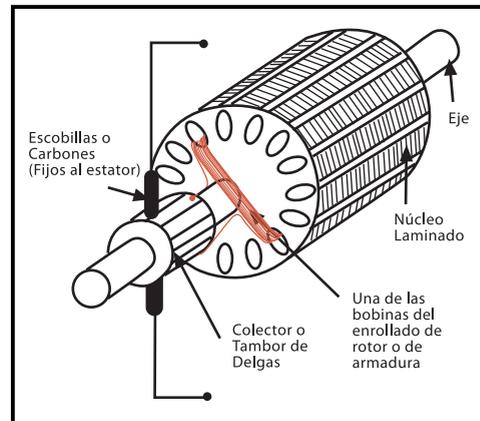


Ilustración 2.14: Rotor de la máquina de corriente continua.

### 2.7.3 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL GENERADOR DE CORRIENTE CONTINUA

Ya se vio, en la Ilustración 2.12 la forma en que una espira plana se transforma en un generador eléctrico alterno. Ahora, si se desea obtener un voltaje rectificado continuo en la salida de la máquina, se debe emplear un sistema que permita conectar

la carga eléctrica al voltaje inducido  $e$  para un rango de  $\theta \in [0, \pi]$  y al inverso del voltaje inducido  $-e$  para  $\theta \in [\pi, 2\pi]$ . Lo anterior se consigue mediante un sistema conmutador, donde el voltaje de la carga se obtiene mediante un par de contactos (escobillas) fijos al estator, que se deslizan sobre los terminales de las bobinas del rotor (delgas), tal como se muestra en la Ilustración 2.15.

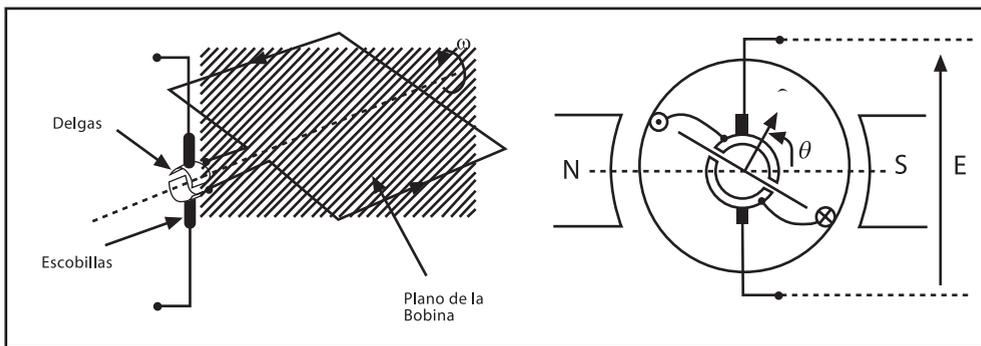


Ilustración 2.15: Proceso de rectificación entre colector y escobillas.

De esta forma, el voltaje en los terminales de las escobillas es el requerido, es decir:

$$E = e \text{ para } \theta \in [0, \pi]$$

$$E = -e \text{ para } \theta \in [\pi, 2\pi]$$

Se debe destacar que los ángulos  $\theta = 0, \pi, 2\pi$  corresponden a los ángulos donde se produce la conmutación, es decir, donde se produce el paso de escobillas de una delga a la siguiente, para una misma bobina. La forma del voltaje en los terminales de las escobillas será:

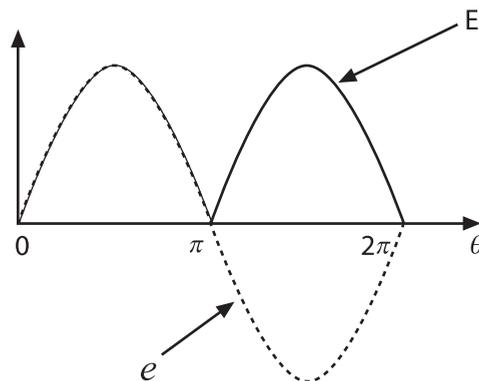


Ilustración 2.16: Voltaje en las escobillas para el caso de una bobina y dos delgas.

Se puede conseguir un voltaje más cercano a un voltaje continuo ideal si se agregan más delgas. Por ejemplo, si se usan dos bobinas ortogonales, con 4 delgas, el voltaje será:

Si se sigue aumentando el número de delgas y bobinas, se logrará un voltaje prácticamente continuo en los terminales de las escobillas, dado por:

$$E \approx E_{m\acute{a}x} = \omega \cdot N \cdot B \cdot D \cdot \ell$$

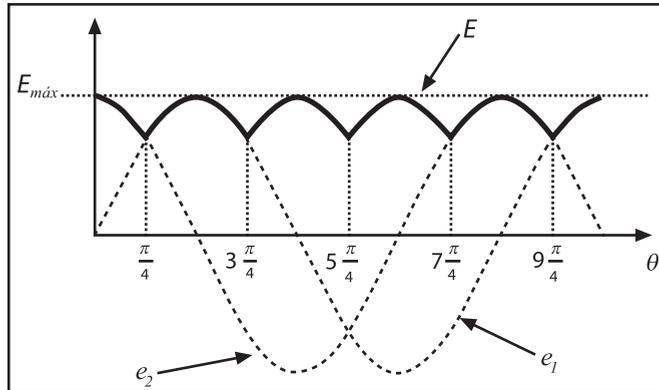


Ilustración 2.17: Voltaje en las escobillas para el caso de dos bobinas y cuatro delgas.

Se observa que  $E$  es proporcional al flujo máximo enlazado por las bobinas  $\phi = B \cdot D \cdot \ell$  y al número de vueltas  $N$  de los enrollados de estator y rotor.

### 2.7.4 GENERADOR DE CORRIENTE CONTINUA Y ERNC

Debido a las complejidades constructivas y de mantenimiento que presentan las máquinas de corriente continua, relacionadas principalmente con el proceso de conmutación que se requiere para rectificar la forma de onda de la tensión de salida de las mismas, éstas han sido desplazadas en la generación eléctrica por las máquinas de corriente alterna. Aún se mantienen en operación en ciertas operaciones como motor, por las ventajas ya señaladas, sin embargo también en este modo de operación han sido reemplazadas por máquinas sincrónicas o asíncronas.

La aplicación más importante del generador de corriente continua en la actualidad es para alimentar con energía eléctrica a los motores de corriente

continua, ya que es capaz de producir formas de onda continuas de tensión y corriente libres de rizado y con un valor fijo y preciso. Esto se traduce en corriente continua que permite una buena conmutación en el motor, careciendo del contenido armónico que introducen los sistemas rectificadores. Sin embargo, con los avances en los dispositivos de electrónica de potencia, así como la utilización de filtros que permiten depurar las formas de onda sinusoidales, nuevamente las máquinas de corriente alterna se constituyen en ventajosas con respecto a las de corriente continua, principalmente desde el punto de vista económico y técnico.

En cuanto a las ERNC, el generador de corriente continua tiene la ventaja de no tener que sincronizar una frecuencia de salida en sus bornes con la frecuencia de la red, sino que se puede utilizar un equipo inversor para conectarlo a la red y de esta manera hacer un mejor uso de los recursos renovables intermitentes para generar energía, sin embargo, lo mismo

se puede conseguir con un generador en corriente alterna (síncrono o asíncrono) y un sistema rectificador/inversor que desacople las frecuencias, por lo que actualmente la principal aplicación de los generadores de corriente continua sólo se limita a generadores eólicos muy pequeños que pueden suministrar, junto a bancos de baterías y, eventualmente, paneles fotovoltaicos, redes de consumo en corriente continua, principalmente en locaciones remotas, como lo pueden constituir sistemas de telecomunicaciones, equipos meteorológicos, entre otros.

## 2.8 MÁQUINA DE INDUCCIÓN

### 2.8.1 INTRODUCCIÓN

Las máquinas de inducción o asíncronas trifásicas, y en particular, los motores de rotor tipo jaula de ardilla, son en la actualidad las máquinas eléctricas de mayor aplicación industrial. La operación usual de esta máquina es como motor, en cuyo caso el funcionamiento básico consiste en alimentar el enrollado trifásico de estator desde una fuente trifásica para producir un campo magnético rotatorio. Este campo rotatorio induce corrientes en el enrollado cortocircuitado del rotor produciéndose así un torque motriz en el eje de la máquina. En aplicaciones ligadas sobre todo a la generación eólica, la máquina también se opera frecuentemente como generador.

### 2.8.2 CARACTERÍSTICAS CONSTRUCTIVAS

En las máquinas de inducción circulan corrientes alternas en el estator y en el rotor. El enrollado del estator es trifásico y de dos o más polos. El enrollado del rotor no tiene alimentación propia y puede ser del tipo bobinado o del tipo jaula de ardilla.

El estator de una máquina de inducción está compuesto por un núcleo laminado de acero (que permite reducir las pérdidas por corrientes alternas parásitas que se inducen en él), el cual tiene ranuras axiales donde se alojan los enrollados debidamente aislados.

El núcleo del rotor también está compuesto por láminas de acero. El enrollado del rotor puede ser de dos tipos:

#### **Rotor tipo Jaula de Ardilla:**

Consiste en una serie de barras axiales de aluminio o cobre (alojadas en las ranuras del rotor) cortocircuitadas en sus extremos por dos anillos conductores. La gran simplicidad en el diseño de este rotor es la que le otorga a la máquina de inducción las ventajas de diseño compacto, costo y mantención.

#### **Rotor tipo Embobinado:**

Es más complejo que el anterior. Los enrollados son similares a los del estator

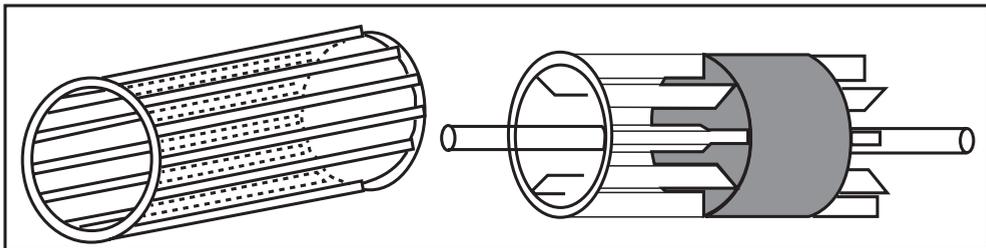


Ilustración 2.18: Rotor tipo jaula de ardilla.

y conservan el mismo número de polos. Los terminales libres de las bobinas están conectados a anillos rozantes montados sobre el eje de la máquina. La placa de terminales se conecta con los anillos mediante escobillas o carbones. En general se pierden los atributos de simplicidad y mantención respecto de la máquina con rotor jaula de ardilla.

### 2.8.3 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

Un estator con tres enrollados idénticos, ubicados físicamente a  $120^\circ$  y alimentados con voltaje trifásico equilibrado, origina un campo magnético rotatorio de magnitud constante el cual gira a una cierta velocidad ( $\omega_s$ ) constante. Cada uno de los enrollados origina un flujo cuya magnitud varía sinusoidalmente en el tiempo y cuya dirección principal, coincide con el eje del enrollado. De este modo se genera, para cada fase, una fuerza magnetomotriz en el estator ( $Fe$ ) que, de acuerdo con la ley de Ampere, está dada por:

$$Fe_j = N \cdot i_j \quad j = a, b, c$$

En la Ilustración 2.19 se ejemplifica este fenómeno para la Fase a. Las expresiones

para las fuerzas generadas por cada fase, en un punto cualquiera del entrehierro, resultan ser:

$$\begin{aligned} Fe_a &= N \cdot i_a \cdot \cos(\theta) \\ Fe_b &= N \cdot i_b \cdot \cos(\theta - 120^\circ) \\ Fe_c &= N \cdot i_c \cdot \cos(\theta - 240^\circ) \end{aligned}$$

Donde  $\theta$  es el ángulo que determina la posición donde se calculan las fuerzas magnetomotrices.

Además considerando que las corrientes son:

$$\begin{aligned} i_a &= I_{\max} \cdot \cos(\omega t) \\ i_b &= I_{\max} \cdot \cos(\omega t - 120^\circ) \end{aligned}$$

Donde la frecuencia eléctrica de alimentación es:

$$\omega = 2\pi \cdot f \left[ \frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]$$

La fuerza magnetomotriz total correspondiente a la suma de las fuerzas generadas por las fases "a", "b" y "c" resulta ser:

$$Fe = \frac{3}{2} \cdot F_m \cdot \cos(\omega t - \theta)$$

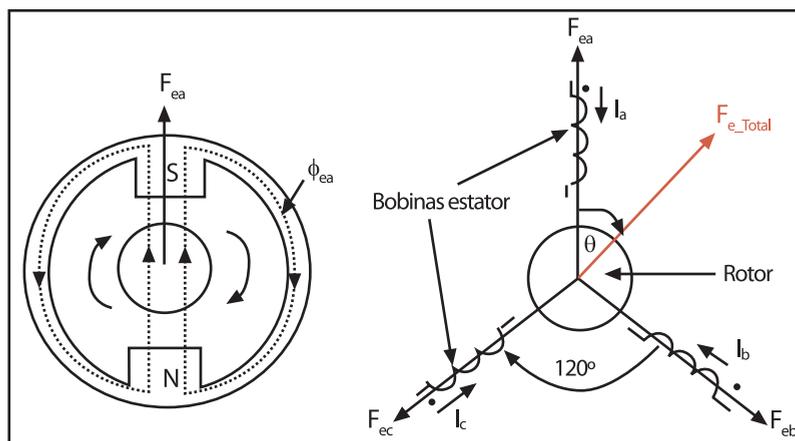


Ilustración 2.19: Motor de inducción de dos polos.

Entonces es posible ver que la fuerza magnetomotriz producida por el estator es una onda viajera que se mueve a velocidad constante ( $\omega$ ) y cuya magnitud varía sinusoidalmente en cada punto del entrehierro. La ecuación anterior indica que cuando se tiene un único par de polos, se tiene que la velocidad síncrona del campo magnético del estator (representado a través de la fuerza  $F_e$ ) coincide con la frecuencia de alimentación de la red eléctrica trifásica, es decir:

$$\omega_s = \omega$$

Sin embargo, al aumentar el número de polos, el aporte que realiza cada fase al campo magnético rotatorio corresponde a la suma de los aportes de cada par de polos. Se obtiene finalmente que la velocidad síncrona, en el caso general, es:

$$n_s = \frac{120 \cdot f}{p} \text{ [rpm]}$$

Donde  $P$  es el número de polos de la máquina y  $\omega = 2\pi \cdot f$  es la frecuencia de la red.

Si el rotor gira en el mismo sentido del campo rotatorio del estator, con una velocidad  $n$  [rpm], necesariamente  $n$  debe ser diferente de  $n_s$  para que circulen corrientes rotóricas y se produzca torque. Luego, el rotor atrasará en  $(n_s - n)$  [rpm] al campo rotatorio del estator, definiéndose como deslizamiento del rotor este atraso referido a :

$$s = \frac{n_s - n}{n_s}$$

Y por lo tanto:

$$n = n_s \cdot (1 - s)$$

Además, dado que la velocidad del campo magnético del estator respecto del

### VARIACIÓN DE VELOCIDAD DE LA MÁQUINA DE INDUCCIÓN

*Para variar la velocidad del motor de inducción puede cambiarse la velocidad síncrona de éste, o bien variar el deslizamiento de la máquina. En el primer caso (cambiar la velocidad síncrona) se puede cambiar el número de polos de la máquina o bien cambiar la frecuencia de la red eléctrica que enfrenta el motor, incluyendo un Variador de Frecuencia entre la red y la máquina. Por otro lado, si lo que se desea es cambiar el deslizamiento se puede variar la tensión de la línea o las resistencias en el rotor, con lo cual se logra modificar la forma de la curva torque-velocidad y consecuentemente, como el punto de operación viene fijo por la intersección de esta curva con la característica de torque de la carga, se opera a una velocidad distinta modificando el deslizamiento con respecto a la velocidad síncrona.*

rotor es  $n_s - n = s \cdot n_s$ , la frecuencia de las corrientes rotóricas inducidas será:

$$f_r = s \cdot f$$

Al estar detenida la máquina ( $n = 0$ ), el deslizamiento vale  $s = 1$ . La frecuencia del rotor vale  $f_r = f$ . Una vez en marcha, la máquina alcanzará una velocidad  $n$  levemente inferior a la síncrona. Funcionando como motor, la máquina no alcanzará nunca la velocidad síncrona, ya que en ese caso no habría corte de líneas de flujo por las barras del rotor, por lo que no se inducen voltajes ni corrientes rotóricas y el torque ejercido sería nulo.

Al rotar la máquina con velocidad  $n$  en el mismo sentido del campo se inducirán corrientes de frecuencias  $s \cdot f$  en el rotor, las que a su vez producirán un campo que girará a  $s \cdot n_s$  [rpm] con respecto al rotor.

Como el motor gira con una velocidad de  $n$  [rpm], la velocidad del campo rotórico en el espacio será la suma de ambas (la velocidad relativa y la de arrastre):

$$n_{(fmm\ rotor)} = s \cdot n_s + n = s \cdot n_s + n_s \cdot (1-s) = n_s$$

De esto se desprende que tanto el campo del estator como el del rotor giran a velocidad síncrona y están fijos uno respecto del otro, produciéndose de esta manera un torque continuo en la máquina.

### 2.8.4 CARACTERÍSTICA TORQUE – VELOCIDAD

La curva característica torque velocidad para el torque electromecánico en el eje a partir del deslizamiento, que se obtiene a partir de las relaciones electromecánicas para la máquina de inducción, es la que se muestra en la Ilustración 2.20.

La máquina funciona como motor cuando  $s > 0$  y como generador cuando  $s < 0$ . Por otro lado, cuando  $s > 1$ , la máquina está rotando en sentido contrario al campo rotatorio, funcionando como freno eléctrico. Se debe notar que como la máquina parte siempre detenida, su operación inicial siempre será como motor y se debe llevar a la máquina, mediante un sistema motriz externo a operar como generador, es decir, a velocidades levemente mayores a la síncrona.

El torque máximo de la máquina de inducción no depende de la resistencia del rotor  $r_r'$ . Sin embargo, el deslizamiento al cual se produce dicho torque sí depende de dicho valor, por lo que es posible controlar la velocidad a la que se produce el valor máximo del torque mediante la resistencia rotórica, tal como se presenta en la Ilustración 2.21.

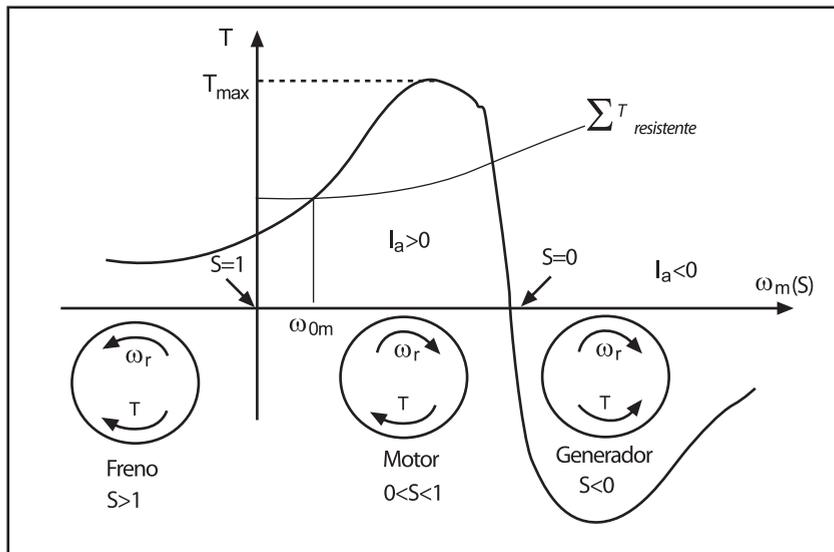


Ilustración 2.20: Curva Torque-Velocidad de la Máquina de Inducción.

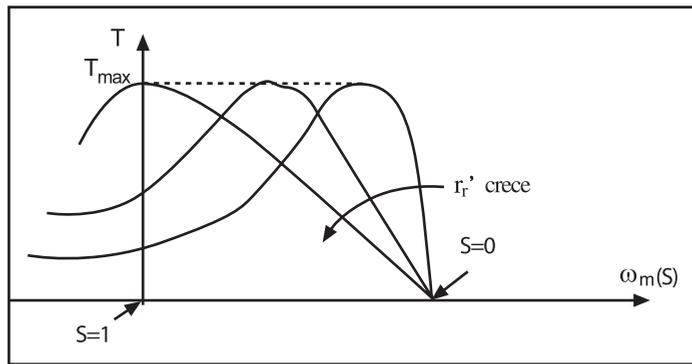


Ilustración 2.21: Curva Torque-Velocidad en función de  $r_r'$  de la Máquina de Inducción.

### MÉTODOS DE PARTIDA DE MÁQUINAS DE INDUCCIÓN

Se pueden considerar dos mecanismos básicos para realizar el control en la partida de la máquina de inducción:

**Partida con Resistencias Rotóricas Adicionales:** Los motores de rotor bobinado se hacen partir con resistencias adicionales en el circuito del rotor. Con ello se logra que el torque máximo ocurra aproximadamente en la partida de la máquina, al mismo tiempo que se limita la corriente máxima de partida a valores seguros.

**Partida con Tensión Reducida:** En motores con jaula de ardilla o con rotor bobinado, se puede recurrir al método de reducir el voltaje a la partida, reduciéndose con esto la corriente de partida y disminuyendo también el torque (el cual varía con el cuadrado del voltaje). Actualmente, para esto se utilizan comandos y protecciones electrónicas, usándose un equipo llamado Partidor Suave, el cual se encarga que el motor consuma, durante la partida, menor corriente, reduciendo el voltaje con respecto a la condición normal, con lo cual se reduce también el torque. De ahí el voltaje, y con ello el torque, van aumentando paulatinamente a medida que la máquina llega a su régimen permanente.

De este modo, una resistencia rotórica alta permite acercarse al torque máximo a la partida, lo cual representa una ventaja en aplicaciones donde se debe vencer una gran inercia inicial. Además, la variación de la resistencia rotórica también permite controlar el valor de la corriente de partida, la cual suele ser entre 5 a 7 veces la corriente nominal.

Así, el aumento de la resistencia del rotor no sólo mejora la magnitud del torque de partida, sino que además permite limitar la corriente de partida que normalmente, debido a su alto valor, es dañina para el motor.

### 2.8.5 OPERACIÓN DEL GENERADOR DE INDUCCIÓN

Se desprende de las fórmulas de torque y potencia que para un deslizamiento del motor de inducción entre cero y uno ( $n = n_s$  y  $n = 0$  respectivamente) la potencia y el torque resultan positivos, indicando un funcionamiento como motor. Para un deslizamiento negativo (velocidad del rotor superior a la síncrona) resultan tanto el torque como la potencia de valor negativo, lo que significa que la máquina actúa como generador.

En este caso el rotor gira a una velocidad superior que la del campo rotatorio del

estator. Este campo rotatorio se produce debido a la corriente de magnetización que circula desde la red de alimentación y que debe seguir circulando, aún después que la máquina haya sobrepasado la velocidad síncrona, convirtiéndose en un generador de inducción. Esta corriente de magnetización o excitación debe provenir de una fuente externa, no siendo capaz el generador de autoexcitarse independientemente. Si esta fuente externa se desconecta, la corriente de excitación se hace cero, desapareciendo el flujo de entrehierro y el voltaje, entonces la máquina deja de generar. Lo anterior implica que un generador de inducción siempre debe absorber reactivos (potencia reactiva) desde la red eléctrica, presentando en todos los casos un factor de potencia inductivo (lo cual le da el nombre) a diferencia de lo que se verá luego para los generadores sincrónicos.

## 2.8.6 GENERADOR DE INDUCCIÓN Y ERNC

La principal ventaja de los generadores de inducción es su simpleza constructiva (en el caso de rotor tipo jaula de ardilla), lo que se traduce en menores costos de inversión y de mantenimiento con respecto a otros tipos de generadores. Por otro lado, estos generadores no necesitan de alimentación en corriente continua para el campo.

Lo anterior hace que estos generadores sean los más comunes en generación eólica, principalmente en el rango que va entre los 20 kW hasta varios MW de capacidad. También pueden utilizarse en aplicaciones hidroeléctricas, pero en éstas es aún notable el predominio de los generadores sincrónicos.

Para conectar un generador de inducción a la red y permitirle operar con recursos energéticos primarios

intermitentes, como el viento, o los recursos hídricos, se debe tener especial cuidado en mantener la sincronización de la frecuencia de las variables de salida del generador y de la red eléctrica o los consumos. Lo anterior se traduce en la necesidad común de desacoplar estas frecuencias mediante la inclusión de un sistema rectificador-inversor para conectarse a la red.

La principal desventaja de estos generadores es que requieren una fuente externa de reactivos, por lo que en sistemas aislados deben funcionar simultáneamente con un generador sincrónico o estar acoplados a condensadores en paralelo con sus terminales. En sistemas aislados, necesitan también de una fuente que fije la frecuencia del sistema (generador Diesel o inversor), aunque también pueden incorporar un grupo rectificador-inversor permitiéndoles operar a velocidad variable. Dicho grupo ajusta la tensión y frecuencia que llega a los consumos, evitando transitorios indeseados.

## 2.9 MÁQUINA SINCRÓNICA

### 2.9.1 INTRODUCCIÓN

Las máquinas sincrónicas son máquinas de corriente alterna que se caracterizan por tener una velocidad del eje dependiente directamente con la frecuencia de las variables eléctricas. Pueden ser monofásicas o polifásicas, y preferentemente trifásicas. En términos prácticos, las máquinas síncronas tienen su mayor aplicación a altas potencia, particularmente como generadores ya sea a bajas revoluciones en centrales hidroeléctricas, o bien a altas revoluciones en turbinas de vapor o gas. La máquina sincrónica como generador se usa prácticamente en toda central generadora.

Cuando la máquina se encuentra conectada a la red, la velocidad de su eje depende directamente de la frecuencia de

las variables eléctricas (voltaje y corriente) y del número de polos. Este hecho da origen a su nombre, ya que se dice que la máquina opera en sincronismo con la red.

Por otro lado, en la operación como generador aislado de la red, la frecuencia de las corrientes generadas depende directamente de la velocidad mecánica del eje.

Adicionalmente a la operación como motor y generador, el control sobre la alimentación del rotor hace que la máquina síncrona pueda operar ya sea absorbiendo o inyectando reactivos a la red en cuyo caso se conocen como reactor o condensador síncrono respectivamente. Particularmente esta última aplicación es utilizada para mejorar el factor de potencia del sistema eléctrico el cual tiende a ser inductivo debido a las características típicas de los consumos.

### 2.9.2 ASPECTOS CONSTRUCTIVOS

Esta máquina, como las anteriores, se encuentra formada por dos partes principales, una parte móvil o rotor, y una parte fija o estator. En estas máquinas el estator se encuentra alimentado por corriente alterna, en tanto el rotor tiene alimentación continua ya sea a través de un enrollado de campo o bien mediante imanes permanentes.

El estator está compuesto por un núcleo laminado de acero, el cual tiene ranuras axiales donde se alojan los enrollados debidamente aislados, mientras que, por otro lado, el rotor puede estar conformado por:

- Rotor de Imanes permanentes.
- Rotor de polos salientes.
- Rotor cilíndrico.

Los rotores de imanes permanentes (PMSG, Permanent Magnets Synchronous Generator) representan la configuración más simple ya que evita el uso de anillos rozantes para alimentar el rotor, sin embargo su aplicación a altas potencias se encuentra limitada ya que las densidades de flujo magnético de los imanes no es, por lo general, alta. Adicionalmente, los imanes permanentes crean un campo magnético fijo no controlable a diferencia de los rotores con enrollados de excitación donde se puede controlar la densidad de flujo magnético.

Dentro de los rotores con enrollados de excitación se tienen los de tipo cilíndrico y los de polos salientes. Generadores con rotor cilíndrico se emplean en conjunto con turbinas a gas o de vapor de gran velocidad de funcionamiento; en cambio, turbinas hidráulicas o motores de combustión impulsan generalmente generadores con rotor de polos salientes. Ambos tipos se muestran en la Ilustración 2.23.

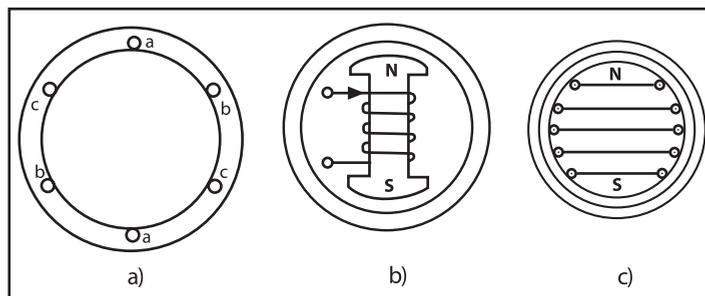


Ilustración 2.23: Partes de una máquina síncrona: a) Estator, b) Rotor de Polos Salientes, c) Rotor Cilíndrico.

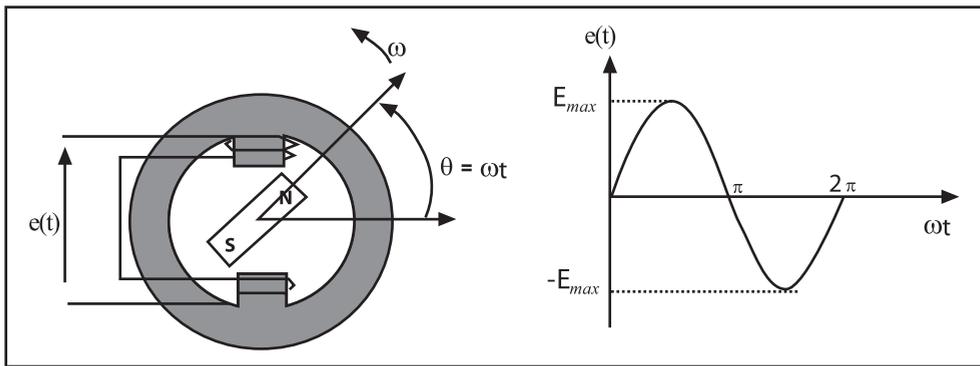


Ilustración 2.24: Generador síncrono monofásico.

### 2.9.3 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL GENERADOR SINCRÓNICO

En la Ilustración 2.24 se muestra un generador síncrono monofásico. El rotor del generador consiste en un imán permanente que genera un campo magnético  $\vec{B}$  constante y se encuentra rotando (gracias a una máquina impulsora externa) a una velocidad angular  $\omega$ .

El giro del eje del rotor hace que el flujo enlazado por la bobina del estator sea variable de modo que se induce una tensión debido a esta variación (Ley de Faraday-Lenz). La tensión generada en los terminales del estator es:

$$e(t) = k \cdot B \cdot \omega \cdot \text{sen}(\omega t) = E_{\text{max}} \cdot \text{sen}(\omega t)$$

Donde:

- $k$  es una constante de diseño de la máquina.
- $B$  es la densidad de flujo magnético generada por el rotor.
- $\omega$  es la velocidad mecánica del rotor.

De acuerdo con la ecuación anterior, la máquina corresponde a un generador de voltaje alterno sinusoidal, cuya frecuencia eléctrica  $\omega_e = \omega$  es igual a la velocidad mecánica de giro del rotor  $\omega_m = \omega$ . Por esta razón se denomina

generador síncrono, y corresponde a la velocidad de sincronismo. Se observa además, que la magnitud de la tensión generada es proporcional a la densidad de flujo magnético. De este modo, si en lugar de un imán permanente se coloca un enrollado de excitación en el rotor, es posible controlar el valor máximo del voltaje inducido a través de la alimentación del mismo en corriente continua.

El caso anterior corresponde a un generador con dos polos. En el caso de un generador con un mayor número de polos, la frecuencia eléctrica generada será equivalente a:

$$f = \frac{n_s \cdot p}{120} [\text{Hz}]$$

Donde:

- $f$  es la frecuencia eléctrica de la tensión generada.
- $n_s$  es la velocidad de giro del eje en revoluciones por minuto [rpm] (velocidad síncrona).
- $p$  es el número de polos del generador.

La máquina descrita anteriormente es un generador síncrono monofásico, de velocidad síncrona  $n_s$ . Sin embargo, resulta fácil entender que si se ubican bobinas de estator desplazadas en el espacio, los voltajes que se generan

resultarán desfasados en el tiempo. En particular, si se emplean 3 enrollados desplazados en el espacio en  $120^\circ$  eléctricos, donde se debe considerar la relación:

$$\angle_{\text{eléctrico}} = \left( \frac{p}{2} \right) \cdot \angle_{\text{mecánico}}$$

Donde  $p$  es el número de polos, se tiene un generador síncrono trifásico.

En la Ilustración 2.25 se muestra un esquema de lo explicado anteriormente. Se observa entonces, que las tensiones en cada una de las fases son iguales en magnitud, y desfasadas en  $120^\circ$  en el tiempo. Al igual que en el caso monofásico, la frecuencia de los voltajes generados está relacionada con la velocidad mecánica del eje mediante la misma ecuación que antes. Esta relación directa entre  $f$  y  $n$  obliga a emplear controles apropiados para mantener la velocidad mecánica constante, si se desea que la frecuencia del voltaje generado no varíe.

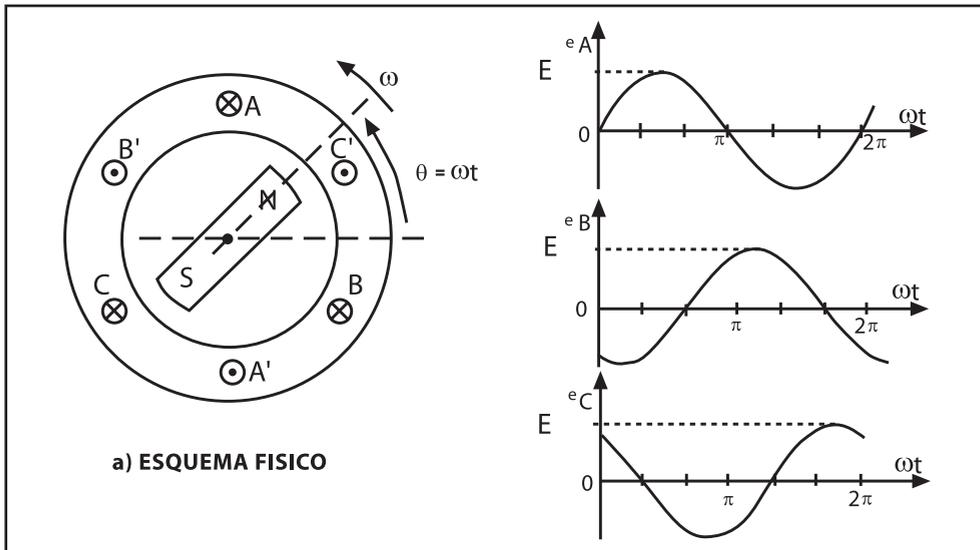


Ilustración 2.25: Generador síncrono trifásico.

### 2.9.4 POTENCIA DE LA MÁQUINA SINCÓNICA

Se define  $x_s$  como la reactancia síncrona del generador de rotor cilíndrico (para el generador de polos salientes es necesario definir dos reactancias en cuadratura). Si  $I$  es la corriente real por fase del estator,  $V$  es el voltaje por fase de los enrollados reales de estator,  $E$  es el voltaje en vacío por fase, que depende proporcionalmente (en la zona lineal) de la corriente del rotor y de la velocidad ( $R_s$

es la resistencia síncrona), se cumplen las relaciones siguientes:

$$E = (r_s + jx_s) \cdot I + V \quad (\text{Generador})$$

$$V = (r_s + jx_s) \cdot I + E \quad (\text{Motor})$$

De esta forma, en este caso es posible definir un circuito equivalente por fase para el generador síncrono, el cual se muestra en la Ilustración 2.26 (en general  $R_s$  se puede despreciar con respecto a  $X_s$ ).

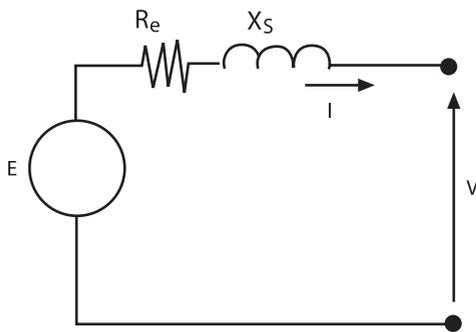


Ilustración 2.26: Circuito equivalente monofásico del generador sincrónico de rotor cilíndrico.

Las expresiones que definen las potencias activa y reactiva trifásicas en los terminales de la máquina sincrónica de rotor cilíndrico, cuando se desprecia  $R_s$  son:

$$P_{3\phi} = \left( \frac{3 \cdot V_{fn} \cdot E_{fn}}{X_s} \right) \cdot \text{sen}(\delta)$$

$$Q_{3\phi} = \left( \frac{3 \cdot V_{fn}^2}{X_s} \right) \cdot (E_{fn} \cdot \cos(\delta) - V_{fn})$$

Donde  $V_{fn}$  y  $E_{fn}$  son el voltaje en los terminales y en vacío (respectivamente) que se extraen del circuito equivalente por fase mostrado anteriormente, es decir,

son voltajes entre fase y neutro, y  $\delta$  es el ángulo en que  $E_{fn}$  adelanta a  $V_{fn}$ , que para el caso de un generador es siempre positivo, mientras que para el caso de un motor es siempre negativo, lo cual implica que el generador tenga siempre  $P_{3\phi}$  positivo y el motor recibe  $P_{3\phi}$  desde la red (es negativa). En cambio  $Q_{3\phi}$  puede ser positivo o negativo dependiendo del valor que tome la corriente de excitación, ya sea trabajando como generador o como motor.

### 2.9.5 RÉGIMEN DE OPERACIÓN DE LA MÁQUINA SINCRÓNICA

En la Ilustración 2.27 se muestra la operación de una máquina sincrónica en los cuatro cuadrantes de un diagrama P-Q. En el diagrama se considera la potencia activa positiva cuando ésta es suministrada por la máquina hacia la carga (o la red), con lo cual los cuadrantes I y IV corresponden a la máquina operando como generador y los cuadrantes II y III a la máquina operando como motor. En el caso de la potencia reactiva, ésta es positiva si se está inyectando a la carga (o a la red), lo cual se consigue en los cuadrantes I y II, mientras que en los cuadrantes III y IV la máquina absorbe reactivos desde la red.

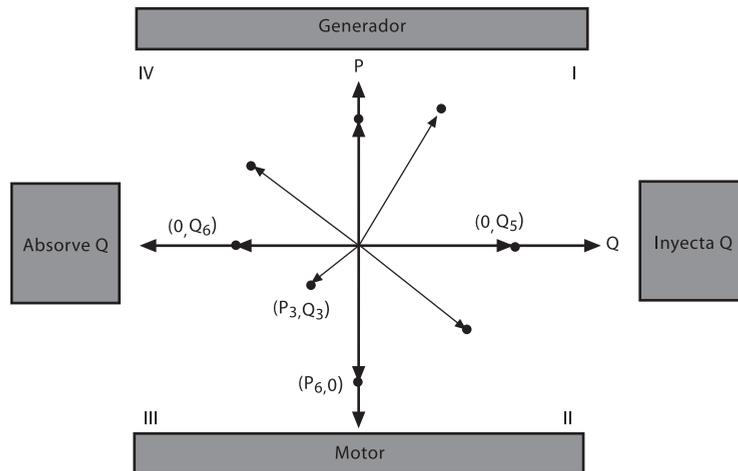


Ilustración 2.27: Operación de la máquina sincrónica en el diagrama PQ.

Los puntos de operación marcados en el diagrama anterior son los siguientes:

PUNTO	OPERACIÓN
(P <sub>1</sub> , Q <sub>1</sub> )	Generador sobrecitado o generador inductivo (P <sub>1</sub> >0 , Q <sub>1</sub> >0)
(P <sub>2</sub> , Q <sub>2</sub> )	Motor sobrecitado o motor capacitivo (P <sub>2</sub> <0 , Q <sub>2</sub> >0)
(P <sub>3</sub> , Q <sub>3</sub> )	Motor subexcitado o motor inductivo (P <sub>3</sub> <0 , Q <sub>3</sub> <0)
(P <sub>4</sub> , Q <sub>4</sub> )	Generador subexcitado o generador capacitivo (P <sub>4</sub> >0 , Q <sub>4</sub> <0)
(0, Q <sub>5</sub> )	Condensador síncrono (P=0, Q <sub>5</sub> >0)
(0, Q <sub>6</sub> )	Reactor síncrono (P=0, Q <sub>6</sub> <0)

### 2.9.6 OPERACIÓN DEL GENERADOR SÍNCRÓNICO ACOPLADO A LA RED

La red eléctrica se puede considerar como una barra infinita. Una barra infinita es un sistema eléctrico tan grande que para todos los efectos es equivalente a un generador síncrono de inercia infinita. Con el fin de lograr una mejor representación de las ideas, conviene considerar como barra infinita, a un punto donde hay una máquina síncrona de dimensiones mucho más grandes (en cuanto a potencia generada) que la máquina síncrona conectada a la barra, cuyo comportamiento se desea estudiar.

De esta forma, una barra infinita es una barra de un sistema eléctrico donde la tensión (módulo y ángulo) y la frecuencia se mantienen constantes para cualquier condición de carga del sistema. Luego, una máquina síncrona conectada a una barra infinita que tiene tanto la frecuencia, como la tensión en sus bornes, fija por la red y no varían ante cambios en la potencia entregada o absorbida por la máquina. Es decir, se cumple que:

$$f = cte.$$

$$V = cte.$$

En esta condición de máquina conectada a la red, se tiene que la potencia mecánica aplicada al eje no variará la velocidad del rotor ya que, como se indicó,

la frecuencia de las variables eléctricas generadas se encuentra fija por la red, lo cual implica directamente que la velocidad de giro del motor también se encuentra fija en la velocidad síncrona. De esta forma, una variación en la potencia aplicada en el eje (potencia mecánica de entrada al generador síncrono) se transformará en potencia eléctrica que se entrega o se recibe desde la red. Cabe señalar que la variación en la potencia mecánica, para este tipo de máquinas, es análogo a decir una variación en el torque, por cuanto se sabe que ambas variables se relacionan, a través de la velocidad síncrona (mecánica), según:

$$T = \frac{P_{mec}}{\omega_s}$$

Y como la velocidad de giro  $\omega = \omega_s$  se encuentra fija por la red, la variación de uno u otro parámetro resulta completamente análoga. De todo lo anterior se puede decir que la potencia activa que puede entregar en bornes el generador (o recibir el motor) depende prácticamente de la potencia mecánica que se le proporciona a éste por el eje. Se debe notar que según las fórmulas mostradas anteriormente también existe una pequeña variación de la potencia activa con la corriente de excitación (reflejada a través del cambio en la tensión interna  $E$ ), pero sin embargo, este efecto es despreciable frente a las variaciones ya señaladas de potencia en el eje.

Por otra parte, el factor de potencia, con que la red va a recibir la potencia mecánica (transformada en eléctrica) aplicada al eje (o a entregarla, para el caso de un motor) va a depender de la corriente de excitación de la máquina. De este modo, si la corriente de excitación es baja (la máquina se encuentra subexcitada) la tensión inducida será baja y por lo tanto, el generador necesitará consumir reactivos para operar a cierta potencia. Contrariamente, si el generador está sobreexcitado se entregarán reactivos a la red. En medio de estas dos condiciones de operación es factible hacer funcionar la máquina con factor de potencia unitario, todo mediante el control de la corriente de excitación de la máquina síncrona. Así, se dice, que se puede controlar la potencia reactiva en los terminales de la máquina actuando sobre la corriente de excitación o rotor, lo que ya se vio, es imposible de realizar en generadores de inducción, donde se requiere de la compensación externa de reactivos (mediante bancos de

condensadores o generadores síncronicos) para llevar el sistema a factores de potencia deseados.

La sincronización se refiere al proceso mediante el cual se conecta una máquina síncrona con la red. Para realizar esta conexión se deben cumplir las siguientes condiciones:

- 1.- Su velocidad de giro debe ser tal que la frecuencia del voltaje generado igual a las frecuencias del voltaje de la red.
- 2.- El voltaje generado en bornes es igual en magnitud al voltaje de la red.
- 3.- Los voltajes generados en la fase del mismo nombre en el generador y en la red, estén en fase. Esto implica que el generador tenga la misma secuencia que la red y que no existan desfases temporales.

En la Ilustración 2.37 se observa que al cerrar el interruptor, el generador G queda en paralelo con la red.

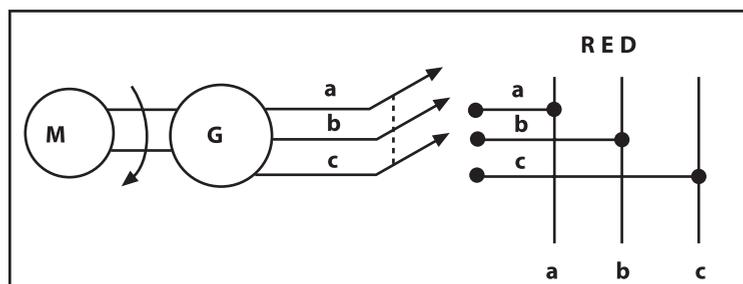


Ilustración 2.37: Conexión en paralelo de un generador con la red (sincronización).

Un frecuencímetro permite controlar la condición (1), un voltímetro la condición (2) y un secuencímetro comprueba que la secuencia a uno y otro lado del interruptor sea la misma. Sin embargo, puede subsistir un desfase entre los voltajes de las fases correspondientes, lo que da origen a un voltaje entre dichas fases. Comprobada entonces la secuencia a ambos lados del interruptor, hay que llevar los voltajes de las fases correspondientes al mismo valor con la misma frecuencia y con desfase cero

entre ellos. Es necesario, entonces, tener un indicador que no sólo verifique el voltaje y la frecuencia a uno y otro lado, sino también el desfase entre fases correspondientes, de modo que cuando el desfase sea nulo se pueda cerrar el interruptor, completando la operación de puesta en paralelo. Hay dispositivos que sincronizan en forma automática, comandando el cierre del interruptor en el momento oportuno, es decir, cuando las condiciones anteriores se satisfacen.

En el caso particular de la máquina síncrona operando como generador (su configuración más ampliamente utilizada),

es posible establecer un diagrama de operación práctico como el que se muestra a continuación.

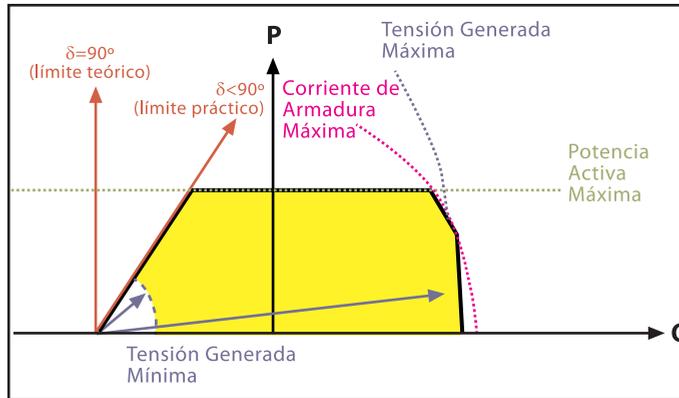


Ilustración 2.38: Carta de operación de un generador síncrono conectado a la red.

En la figura, el área en amarillo corresponde a la zona donde el generador es factible de ser operado, los límites están dados por condiciones prácticas tales como:

de corriente que puede circular por la armadura en condiciones nominales. Exceder este límite perjudica la vida útil de la máquina debido al calentamiento y posible fallas en aislaciones de la máquina.

- **Máximo Ángulo entre las Fuerzas Magnetomotrices:** el límite teórico es  $90^\circ$ , sin embargo en la práctica se opera con ángulos menores ya que se debe garantizar la estabilidad en la operación (si el ángulo  $\delta$  llegase a sobrepasar los  $90^\circ$  la máquina se sale de sincronismo y se acelera peligrosamente).

## 2.9.7 GENERADOR SINCRÓNICO Y ERNC

Los generadores síncronos deben operar a velocidad fija para tener frecuencia constante en bornes por lo que, en el caso de ERNC, no pueden alimentar directamente a los consumos ya que sólo se podría conectar el generador cuando el energético primario (velocidad del viento, caudal hídrico) hiciera girar al rotor a una velocidad que coincidiera perfectamente con su velocidad síncrona, lo cual pierde sentido al tratarse de energéticos intermitentes y variables. Debido a esto, la utilización típica de estos generadores incorpora un grupo rectificador-inversor que permite obtener tensión y corriente de la frecuencia deseada.

- **Potencia Activa Máxima:** corresponde al límite de potencia activa que es capaz de entregar la máquina operando en condiciones nominales.

- **Tensión Generada Mínima y Máxima:** el generador requiere una excitación mínima en el rotor para poder generar tensión y puede generar hasta un límite práctico dado por la máxima corriente rotórica de la máquina.

Una ventaja de los generadores síncronos es que pueden generar potencia reactiva, por lo que no requieren

- **Máxima Corriente de Estator (Armadura):** corresponde al límite

de otra fuente energética en paralelo. Esto los hace útiles para su operación en sistemas aislados y, si a ello se suma el reemplazo del enrollado de campo por imanes permanentes, eliminando la necesidad de alimentación en corriente continua para el campo del rotor, se llega a una configuración simple y de bajo costo, que explica que sean los más utilizados en la actualidad para generadores eólicos menores a 20 kW. Del mismo modo, la posibilidad de entregar energía reactiva a

la red los transforma en los generadores más utilizados en toda generación eléctrica convencional, y también en las aplicaciones mini-hidroeléctricas y basadas en la biomasa.

Para dejar más explícita las principales diferencias en el uso de generadores síncronos y asíncronos en los sistemas de potencia, así como su relación con las ERNC se presenta la siguiente tabla comparativa:

	GENERADOR SÍNCRONO	GENERADOR ASÍNCRONO
<b>VENTAJAS</b>	Mayores costos de inversión y mantenimiento (por enrollados de campo y red DC)	Menores costos de inversión y mantenimiento (simplicidad de diseño cuando tiene rotor jaula de ardilla)
	Posibilidad de operarlo como reactor o condensador (compensación de reactivos)	No requiere alimentación DC (no hay pérdidas por conmutación)
	Si se usan imanes permanentes no hay pérdidas por conmutación.	
	Pueden entregar reactivos a la red (factor de potencia modificable)	
<b>DESVENTAJAS</b>	Si el rotor es un electroimán requiere alimentación DC (hay pérdidas por conmutación)	Necesita una fuente de excitación externa para generar.
	Imanes permanentes tienen limitaciones para producir grandes campos magnéticos.	Se pierde la simplicidad de diseño en el caso de rotor bobinado (diseño más complejo que con jaula de ardilla)
	Imanes permanentes generan campo de magnitud que no se puede modificar.	Siempre consume reactivos de la red (implica necesidad de una fuente de reactivos)
	Necesidad de desacoplar frecuencias de la máquina y de la red (cuando se genera con ERNC)	Necesidad de desacoplar frecuencias de la máquina y de la red (cuando se genera con ERNC)

*Ilustración 2.2: Ventajas y desventajas de los generadores síncronos y de Inducción*

## 2.10 BIBLIOGRAFÍA

1. L. Vargas, J. Romo, Y. del Valle, *Conversión Electromecánica de la Energía*, Capítulos 2 al 7, Santiago, Chile, 2003.
2. G.M. Masters, *Renewable and Efficient Electric Power Systems*, Capítulos 6 al 9, Primera Edición ed. Nueva Jersey, Estados Unidos: John Wiley & Sons, 2004.
3. B. Sorensen, *Renewable Energy Conversion, Transmission and Storage*, Capítulo 14, Primera Edición ed. San Diego, California, Estados Unidos: Academic Press, 2007.
4. S. Misak y L. Prokop, "Off-Grid Power Systems", en 9th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), Praga, República Checa, 2010, pp. 14-17.
5. Mukund R. Patel, *Wind and Solar Power Systems*, Capítulos 1 al 4, Primera Edición ed. Nueva York, Estados Unidos: CRC Press, 1999.
6. L. Vargas, *Apunte de Electromagnetismo*, Capítulo 7, Santiago, Chile, 2008.
7. W. Brokering, R. Palma, L. Vargas, *Ñom Lufke (El Rayo Domado) o Sistemas Eléctricos de Potencia*, Capítulos 4 al 5, Primera Edición ed. Santiago, Chile: Pearson, 2008.

## 2.11 ANEXO AL CAPÍTULO 2

### EXPERIENCIA DE LABORATORIO

Para el mejor aprendizaje de este capítulo se propone realizar la experiencia de laboratorio.

**Objetivos:** Estudiar el funcionamiento de una máquina sincrónica, de inducción y continua. Analizar su operación como generador o motor. Sincronizar el generador sincrónico con la red.

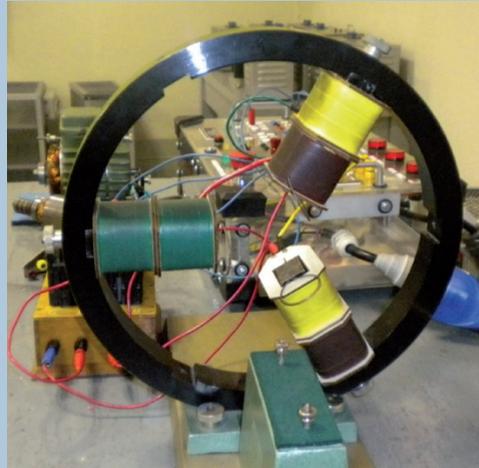
**Instalación:** Se cuenta con un motor de inducción desarmable con diferentes rotores y un acoplamiento entre generador sincrónico y motor continuo con sus respectivos reóstatos. Además se disponen de multímetros y un sincronizador (ampolletas).

#### Desarrollo de experiencia:

1. Identificar las partes del motor de inducción, armarlo y energizarlo.

2. Identificar el acoplamiento entre generador sincrónico y motor continuo. Se estudiará el comportamiento del motor. Realizar la partida del motor. ¿Cómo incide la corriente de campo sobre el torque y las revoluciones? Tratar de obtener las revoluciones para accionar el generador a la frecuencia de la red.

3. Estudiar el efecto sobre las revoluciones del conjunto si se energiza el campo del generador sincrónico. Con el uso de un sincronizador tratar conectar la máquina a la red. Para esto variar tanto la corriente de excitación de la máquina sincrónica, como la del motor continuo. ¿Qué pasa si se conecta en asincronía? ¿Qué pasa si ahora disminuyen el torque de la máquina continua?



#### Procesamiento de datos:

1. Analizar el funcionamiento del motor de inducción.
2. Notar las relaciones que rigen el torque y revoluciones de la máquina continua y sincrónica.
3. Observar los requisitos para la sincronización a la red y cómo llegar a éstos.

En el anexo de este capítulo se encuentra la descripción detallada de la experiencia para las instalaciones de la Fcfm de la Universidad de Chile.

## 2.11.1 DETALLE DE LA EXPERIENCIA DE LABORATORIO DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS PARA LAS INSTALACIONES DEL DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA DE LA UNIVERSIDAD DE CHILE

### ► Instalación del laboratorio

- Motor de inducción.
- Acoplamiento máquina síncrona – continua

Se dispone de una máquina continua que se encuentra acoplada mediante un eje mecánico a la máquina síncrona.

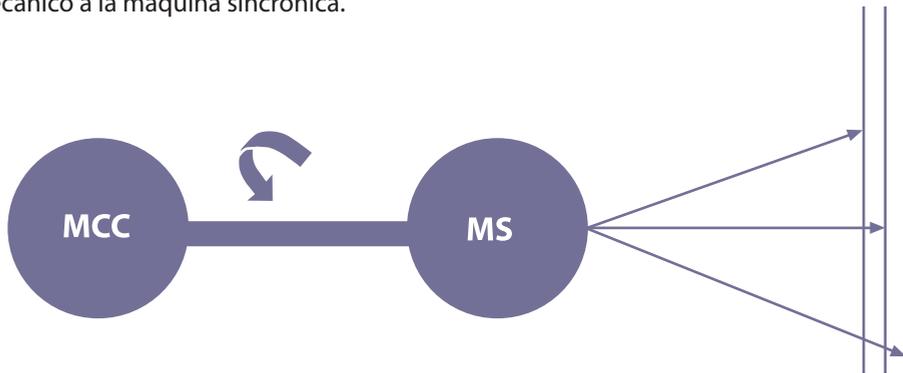


Ilustración 2.39: Acoplamiento mecánico entre máquinas eléctricas

La máquina continua se alimenta con 220 VDC y tiene un reóstato R2 para controlar la corriente de campo. Este controla las revoluciones, es decir funciona como acelerador. Además se cuenta con un reóstato R1 (aparición de estufa) para regular la partida de la máquina. Se cuenta con amperímetros para cuidar de no excederse la corriente máxima permitida por la máquina.

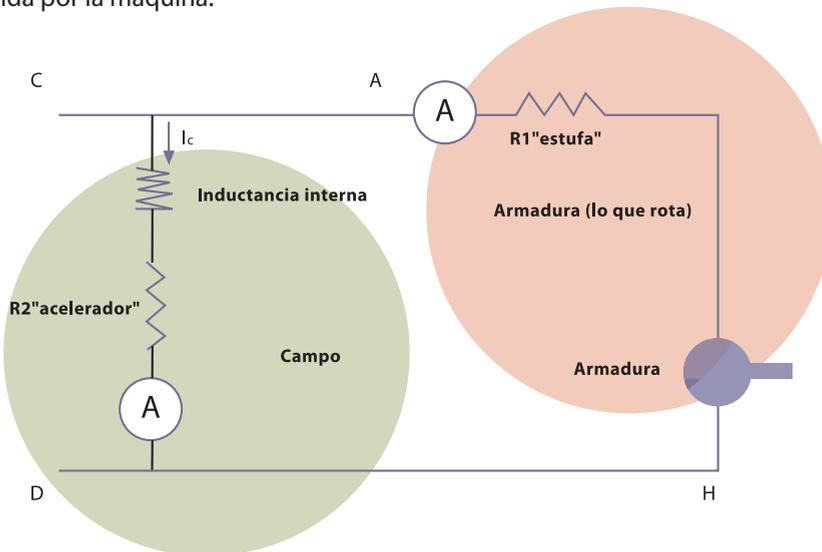


Ilustración 2.40: Circuito de la máquina de corriente continua

La máquina síncrona se alimenta con 110 VDC para la excitación del campo. Tiene un reóstato para controlar la corriente de campo. Las tres fases de salida se conectan a un sincronizador, en este caso unas ampolletas con un polo a la fase del generador y el otro a la fase de la red. Recordar que el voltaje de salida tiene la siguiente dependencia:

$$V_{salida} = k \omega I_c \text{sen}(\omega t + \phi)$$

Donde:

$V_{salida}$ : Voltaje de salida en bornes de la máquina síncrona.

$k$ : Constante propia de la máquina síncrona (dada por sus aspectos constructivos).

$I_c$ : Corriente de campo (controlada por el reóstato ya mencionado).

$\omega$ : Velocidad síncrona.

$\phi$ : Ángulo de fase del voltaje.

Además si se mide el voltaje en una sola fase, el voltaje de línea (fase-fase) vale:

$$V_{línea} = \sqrt{3}V_{fase,neutro}$$

► **Instrucciones para partida del motor de corriente continua y control de su velocidad.**

1. Verificar que el reóstato 1 (R1) se encuentre con resistencias desconectadas (resistencia infinita).
2. El reóstato 2 acelerador (R2) se debe encontrar en la menor resistencia para evitar la aceleración. Recordar que velocidad de giro es:  $\omega = kR/V$  (donde  $k$  es una constante de la máquina).
3. Disminuir gradualmente R1 (conectar interruptores uno por uno) para entregar  $V$  a la armadura.
4. Cuando estén todas las resistencias R1 conectadas desconectar el reóstato (usando el interruptor de bypass). Bajo esta nueva condición, la corriente pasa directo a la armadura, sin resistencias de por medio.
5. Controlar velocidad con R2.

► **Instrucciones para sincronización de la máquina síncrona con la red eléctrica.**

1. Configurar la rotación del eje con el acelerador para obtener 50 Hz.

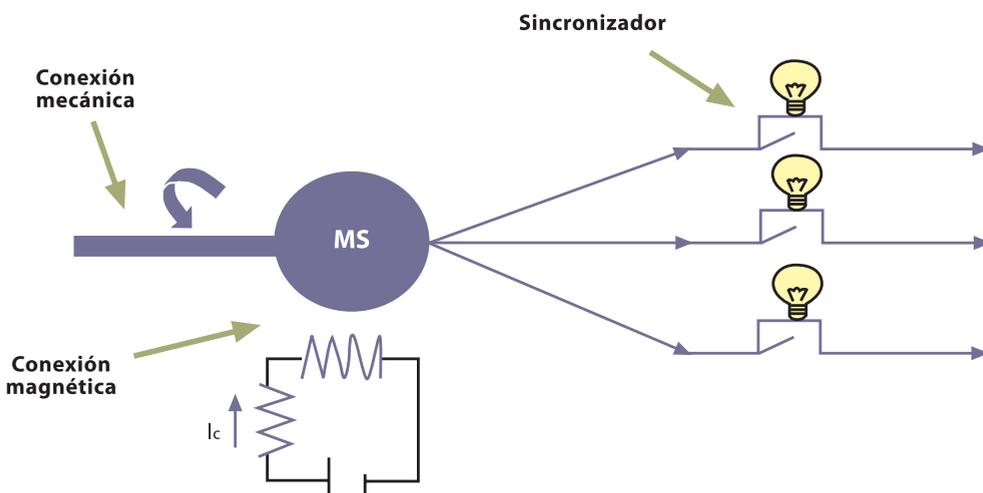


Ilustración 2.41: Circuito de la máquina síncrona

Recordar que las rotaciones por minuto RPM dependen de la frecuencia de red  $f$  y de la cantidad de polos, según la siguiente relación:

$$n = 120 \cdot \frac{f}{p}$$

Donde  $n$  es la velocidad mecánica en RPM (en este caso se requieren 1500 RPM),  $f$  es la frecuencia eléctrica de la red, y  $p$  es el número de polos.

2. Configurar el voltaje de salida en 380 V con el reóstato de campo de la máquina sincrónica.
3. Si existe diferencia de voltaje, frecuencia o desfase entre el generador y la red, las ampolletas parpadean o permanecen siempre prendidas. Puede resultar necesario iterar entre los dos pasos anteriores hasta lograr mantener totalmente apagadas las ampolletas, al menos durante un tiempo suficiente como para conectar la máquina a la red eléctrica.
4. Cuando estén totalmente apagadas, se puede conectar a red.

► **Instrucciones para modificación de la corriente de campo de la máquina sincrónica.**

1. Previo a la partida de la máquina de corriente continua y de la sincronización de la máquina sincrónica con la red eléctrica, se debe incluir un reóstato de corriente continua (Rcc) en serie con el enrollado de campo, como se muestra en la siguiente figura.
2. Posterior a la sincronización se debe realizar la variación del reóstato de campo de la máquina sincrónica (Rcc) para ir observando la variación del factor de potencia de la máquina sincrónica (variación en las potencias activa y reactiva entregada/consumida por la máquina). Observar si la máquina se encuentra subexcitada (lag) o sobreexcitada (lead). Cuando la máquina se encuentra subexcitada consume potencia reactiva desde la red, mientras que cuando está sobreexcitada entrega potencia reactiva a la red.

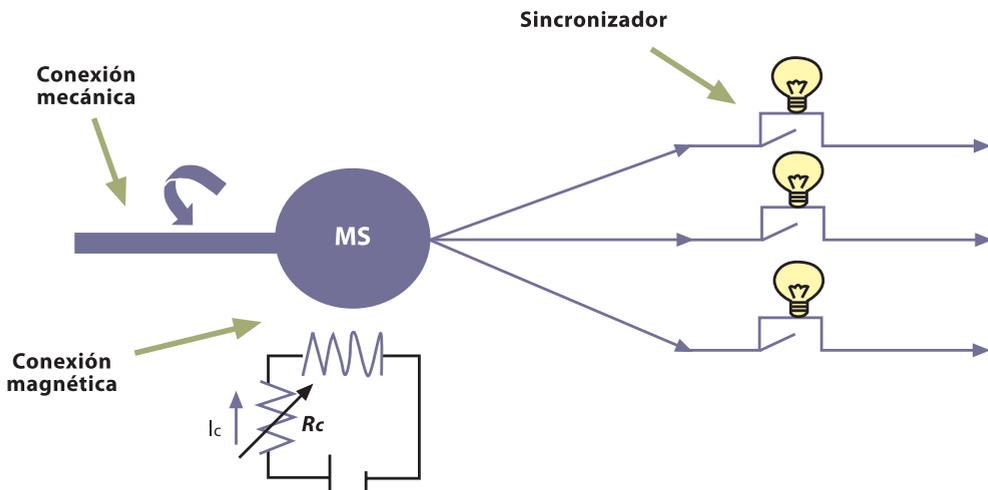


Ilustración 2.42: Circuito de la máquina sincrónica con reóstato de campo.

► **Instrucciones para la conexión del banco de condensadores.**

1. Operar la máquina hasta determinar un punto de operación definido por una potencia activa entregada por la máquinas sincrónica a la red, un factor de potencia y una corriente de campo (Como sugerencia, pruebe operar la máquina entregando 500 W de potencia activa a la red, con una corriente de campo de 2 A y un factor de potencia de 0,8 inductivo (lag).
2. Apagar las máquinas e incluir un banco de tres condensadores idénticos en paralelo con cada una de las fases de la máquina sincrónica.
3. Observar el nuevo factor de potencia que se obtiene con la misma potencia activa y corriente de campo, ambas fijadas anteriormente.
4. Observar el efecto de la inclusión del banco de condensadores sobre el factor de potencia y sobre la corriente de campo mínima para la cual la máquina entrega reactivos a la red (sobreexcitada).

► **Instrucciones para el apagado de ambas máquinas.**

1. Desconectar el generador de la red.
2. Setear el reóstato acelerador (R2) en mínimo.
3. Conectar el reóstato R1y desconectar gradualmente las resistencias.
4. Cortar las alimentaciones desde el tablero.

► **Objetivos de la Experiencia.**

- Identificar las principales máquinas eléctricas para generar energía eléctrica.
- Reconocer las máquinas eléctricas que se ocupan en el aprovechamiento de recursos renovables.
- Comprender los principios básicos de la conversión electromecánica de la energía.
- Sincronizar el generador sincrónico con la red.
- Comprender el concepto de potencia reactiva y factor de potencia.

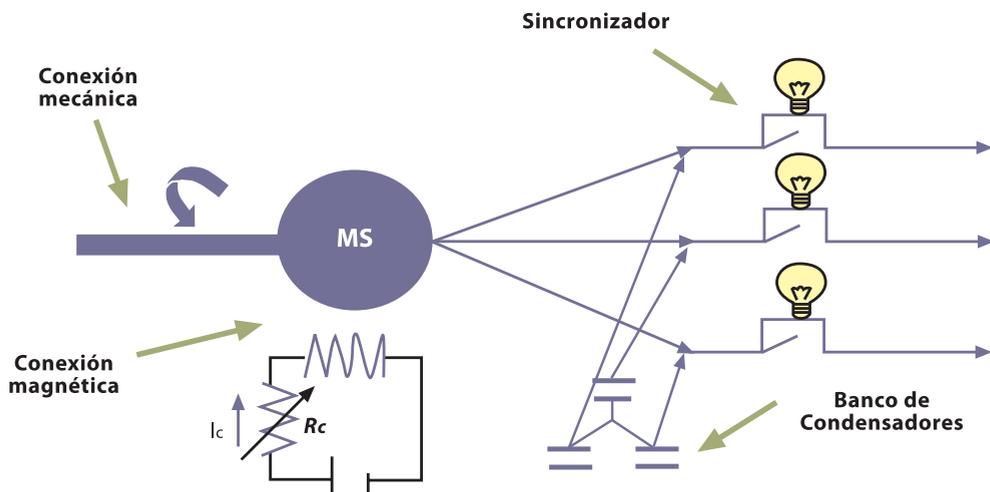


Ilustración 2.43: Circuito de la máquina sincrónica con banco de condensadores.

- Observar el cambio del factor de potencia (potencia reactiva entregada) con la modificación de la corriente de campo del generador sincrónico.
  - Observar el cambio del factor de potencia (potencia reactiva entregada) con la inclusión de condensadores en paralelo con los terminales del generador sincrónico.
- ▶ **Trabajo de Laboratorio.**  
 En la realización de este laboratorio se trabajará con distintas actividades en las que usted debe tomar nota de todo lo experimentado. Estas actividades serán 3:
- Máquina de inducción.
  - Máquina de corriente continua
  - Máquina sincrónica



**PRECAUCIÓN:** No energice las máquinas ni elementos sin previa autorización de su profesor auxiliar o ayudante presente en la experiencia. En cualquier emergencia NO DUDE en ACCIONAR el botón STOP.

A continuación se detallan las actividades que debe realizar en cada experiencia.

- **Máquinas de Inducción:**
  1. Identifique todos los elementos de la máquina. Tome nota de los aspectos constructivos, disposición, tipo de materiales, etc.
  2. Arme el motor de inducción sin ayuda de su ayudante, sin rotor. Haga las conexiones necesarias para que el motor funcione, pero NO ENERGICE sin autorización.
  3. Pida revisión de su ayudante o auxiliar para que pueda energizar.
  4. Utilice la varilla con punta de metal entre los 3 núcleos magnéticos una vez está energizado el motor.
  5. Pruebe con los dos rotores que se le facilitan la reacción al ponerlos entre los 3 núcleos magnéticos.
- **Máquina de corriente continua:**
  1. Identifique todos los elementos de la máquina. Tome nota de los aspectos constructivos, disposición, tipo de materiales, etc.
  2. Identifique además los elementos extras que se utilizan para el funcionamiento de la máquina. Reconozca la conexión realizada por los ayudantes. No olvide considerar la alimentación, la carga y anotar cualquier detalle al respecto. Anote los datos de placa de la máquina y dimensiones su tamaño en comparación con elementos cotidianos.
  3. Utilizando un guante, realice la partida de la máquina de continua como lo indicará el ayudante.
  4. Modifique la velocidad de la máquina con el "reóstato de campo".
  5. Responda, ¿cree ud. que es la única forma de modificar la velocidad de la máquina?
  6. Responda, ¿será posible alimentar una máquina como esta con un panel fotovoltaico?
- **Máquinas sincrónicas:**
  1. Identifique todos los elementos de la máquina. Tome nota de los aspectos constructivos, disposición, tipo de materiales, etc.
  2. Identifique además los elementos extras que se utilizan para el funcionamiento de la máquina. Reconozca la conexión realizada por los ayudantes. No olvide considerar la alimentación, la carga y anotar cualquier detalle al respecto.
  3. Anote los datos de placa de la máquina y dimensione su tamaño en comparación con elementos cotidianos.

4. Si no sabe, pregunte a su ayudante sobre el concepto de “red infinita”.
  5. Responda, ¿por qué es necesario sincronizar una máquina sincrónica?
  6. Analice las características necesarias para que exista sincronización entre la máquina y la red infinita, tanto en términos teóricos como prácticos.
  7. Sincronizar la máquina con la red en condiciones óptimas.
  8. Sincronizar la máquina con la red en condiciones anormales.
  9. Responda, ¿cómo podría mejorarse el sistema de sincronización?
  10. Responda, ¿qué pasa con un sistema que no tiene red infinita?
  11. Responda, ¿una máquina sincrónica solamente puede funcionar si está conectada a la red infinita?
  12. ¿Cuánta potencia consume la máquina sincrónica para alimentar el campo? ¿Y cuánto genera?
  13. Si no sabe, consulte por los conceptos de potencia activa, reactiva y aparente. Además del concepto de factor de potencia.
  14. Responda si un generador sincrónico siempre entrega potencia reactiva a la red o puede recibirla también. ¿Qué ocurre en el caso de los generadores de inducción?
  15. Responda, ¿cómo varía la potencia reactiva del generador a medida que se cambia la corriente de campo de la máquina sincrónica?
  16. Responda, ¿varía la potencia activa del generador a medida que se cambia la corriente de campo de la máquina sincrónica?
  17. Responda de acuerdo a lo anterior, ¿cómo haría Ud. para variar la potencia activa de la máquina sincrónica?
  18. Responda, ¿por qué es importante mantener un adecuado control sobre la potencia reactiva?
  19. Responda. Manteniendo las condiciones de operación fijas, ¿cómo varía el factor de potencia de la máquina al incluir un banco de condensadores en los bornes de la máquina sincrónica? ¿A qué se debe lo anterior?
  20. ¿Cómo se aprovecha el efecto del banco de condensadores en las redes eléctricas reales?
  21. Sin los condensadores, ¿para qué corriente se produce el cambio de factor de potencia inductivo a capacitivo? (o lo que es lo mismo, la máquina pasa de estar subexcitada a sobreexcitada?)
  22. ¿Cómo cambia la corriente anterior al conectar el banco de condensadores?
- **Evaluación de la Experiencia.**
- De acuerdo a lo experimentado y a la investigación propia se deberá entregar un informe. En él explique y muestre con figuras la diferencia entre corriente continua (CC) y corriente alterna (CA).
- Nombre ventajas y desventajas de ambas alimentaciones (CC y CA).
  - De ejemplos de energías renovables utilizando CC y CA.
- En los 4 puntos siguientes apoye su explicación a partir de la experiencia de laboratorio.
- Explique el principio de funcionamiento de una máquina de corriente continua.
  - Explique el principio de funcionamiento de una máquina de inducción.
  - Explique el principio de funcionamiento de una máquina sincrónica.
- Cualquier otra consideración que haya sido experimentada será beneficiada en la evaluación de su informe. Indique cómo se utilizan estas 3 máquinas para aprovechar las energías renovables.

► **Bibliografía recomendada para la confección del Informe.**

- [1] M. Liwischitz-Garik y C.C. Whipple. "Máquinas de Corriente Alterna", Compañía Editorial Continental, S.A., México, 1971.
- [2] G. Thaler y M. Wilcox. "Máquinas Eléctricas", Limusa-Wiley, 1969.
- [3] M. Kostenko y L. Piotrovsky. "Máquinas Eléctricas". Tomo II, Montaner y Simon, 1968.
- [4] A. Fitzgerald y C. Kingsley, J.C. "Electric Machinery". 2nd Ed., Mc Graw-Hill, 1961.
- [5] A. Langsdorf. "Teoría de las Máquinas de Corriente Alterna", Mc Graw-Hill, 1971.
- [6] "Máquinas Eléctricas", Publicación C/5, Depto. de Ingeniería Eléctrica, U. de Chile, 1983.
- [7] J.Romo, L.Vargas: Texto "Apuntes EL42C, Conversión Electromecánica de la Energía", Depto. Ing. Eléctrica, U. de Chile, 1ªed. 2003, 2ªed. 2007.

### 2.11.2 PREGUNTAS PARA EVALUAR LA COMPRESIÓN DEL CAPÍTULO

1. ¿Cuál es la ley de electromagnetismo que gobierna el movimiento de los motores? Explique brevemente cómo funciona.
2. ¿Cuál es la ley de electromagnetismo que gobierna el movimiento de los generadores? Explique brevemente cómo funciona.
3. ¿Qué es el deslizamiento?
4. ¿Qué es el campo magnético? ¿Para qué se necesita en un generador? ¿Cuáles son las opciones para crear un campo magnético en un generador?
5. ¿Qué es un material ferromagnético? ¿Cuál es su relación con las máquinas eléctricas?
6. ¿Qué es la potencia reactiva? ¿Por qué es necesario compensarla?
7. Indique cuál es el valor RMS de una

señal de corriente de la forma:  $v(t) = V_m \cos(\omega t)$

8. ¿Cuál es la potencia activa y reactiva asociada a una carga resistiva R que es alimentada por la fuente de voltaje indicada en la pregunta anterior?
9. ¿Es posible que el generador sincrónico sea de velocidad variable conectado a una red eléctrica? ¿Por qué no?
10. Explique la función de un rectificador, de un inversor y de un transformador.
11. Considere una mini central hidráulica conectada por una línea de transmisión de impedancia  $Z_{l1}$  a un consumo de impedancia  $Z = R + jX_L - j1/X_C$ . En el consumo hay  $380[V]@50[Hz]$ . ¿Cuál es la energía entregada en un año al consumo?
12. Un aerogenerador de 1,2 MW se encuentra inyectando reactivos a la red. Si el factor de potencia es 0,85 y la compañía de transmisión exige 0,95, dimensione un banco de condensadores adecuado.

### 2.11.3 PREGUNTAS CON SOLUCIÓN

- P1** ¿Qué tipo de máquinas recomendaría para las siguientes aplicaciones?
- a) Generación eólica
  - b) Generación mini-hidro
  - c) Central hidroeléctrica
  - d) Motor de correa transportadora
  - e) Motor de disquete de computador
  - f) Motor de auto de juguete
  - g) Grupo electrógeno
  - h) Bomba de extracción de agua de pozo
  - i) Molienda SAG

**Solución**

- a) Generación eólica:  
Para generar electricidad a partir del viento es posible utilizar los 2 tipos de máquinas alternas que ya conocemos: una **máquina de inducción** o una **máquina sincrónica**. De acuerdo al tipo de máquina que se utilice se tendrán distintos tipos de funcionamiento, lo que está determinado

por distintas tecnologías. Se recomienda cualquiera de estas máquinas pensando en la conexión a sistemas que estén actualmente funcionando con corriente alterna, donde se pueda inyectar potencia desde un parque eólico. Ahora, debido a la gran variabilidad de la velocidad del viento, lo que hará girar el eje de la máquina a diferentes velocidades, no es posible utilizar máquinas sincrónicas conectadas directamente a la red y necesitarán de dispositivos de electrónica de potencia para la conexión. Por este motivo, y debido a que los elementos de electrónica de potencia son de gran costo, es que en general se utilizan máquinas de inducción. En la Unidad de Energía Eólica se verá con mayor detalle cada tecnología utilizada en la actualidad.

b) Generación mini-hidro

Al igual que en el caso anterior, una central mini-hidro está pensada para funcionar con sistemas alternos. Sin embargo en este caso, es muy factible controlar la cantidad de agua que pasará por la turbina, logrando de esa forma un gran control de velocidad para el giro de la máquina y por lo tanto se recomienda utilizar **máquinas sincrónicas** que se conectan directamente a la red.

c) Central hidroeléctrica

Una central hidroeléctrica es un caso en grandes magnitudes del anterior, en donde incluso existen mejores técnicas para controlar el flujo de agua que pasa por la turbina, por lo tanto la máquina recomendada es sin duda una **máquina sincrónica**.

d) Motor de correa transportadora

Debido a que lo que importa en este caso es tener una velocidad y un torque variable para mover distintas cantidades de material, es recomendable utilizar **máquinas de corriente continua** o **máquinas de inducción**. Sin embargo hay que tener en consideración que para ambos casos es necesario utilizar electrónica de potencia. En el caso de la máquina continua, es

necesario rectificar la tensión alterna de la red para poder alimentar la máquina, pero luego el control es bastante simple y de bajo costo. Por otro lado, la máquina de inducción necesita un control bastante inteligente para poder variar su velocidad fácilmente y para ello necesita un “variador de frecuencia”, que corresponde a un rectificador en cascada con un inversor que modifica la frecuencia de la señal sinusoidal. Esto último corresponde a mayores inversiones. Sin embargo, como los costos de la electrónica de potencia han bajado sumado a que las máquinas de inducción necesitan menor mantención ya que no tienen partes rozantes, es que las viejas máquinas de continua han empezado a ser reemplazadas por nuevas máquinas de inducción electrónicamente controladas.

e) Motor de disquetera de computador

Las disqueteras son un caso muy atractivo ya que utilizan **máquinas sincrónicas** para su funcionamiento. Esto es, se alimentan con tensión continua pero tienen un pequeño inversor que genera una señal alterna. En la práctica a los motores de disquetera se les nombra BLDC (brushless DC motors), ya que se alimentan con corriente continua pero no tienen escobillas en el estator, porque en realidad son sincrónicas.

f) Motor de auto de juguete

Debido a que la fuente de energía más fácil de transportar corresponde a una batería de corriente continua, entonces es recomendable diseñar un auto de juguete con una **máquina de continua** como motor.

g) Grupo electrógeno

Un grupo electrógeno corresponde a un equipo motor-generador. El motor es alimentado por algún tipo de combustible (gas, diesel, bencina), que se quema para hacer girar la turbina, ésta está acoplada al

eje de una máquina que se conectará a una red eléctrica. Debido a que es fácil controlar el giro del motor con la combustión lo más recomendable entonces es utilizar una **máquina sincrónica** para generar electricidad.

h) Bomba de extracción de agua de pozo Debido a la variabilidad de la cantidad de agua y a la altura a la que ésta se encuentra en un pozo, es que una máquina debe ser capaz de variar su velocidad para sacar agua siempre de la forma más óptima posible. Ahora en la práctica es poco común que se haga "de la forma más óptima" y simplemente se saca toda el agua que se pueda, por ello se utiliza una **máquina de inducción** que sólo necesita ser alimentada con corriente alterna en el estator y no es necesario realizar ninguna transformación. Por otro lado, aprovechando el uso típico de máquinas de inducción en esta aplicación, es que se siguen utilizando al querer ser más óptimos, agregando electrónica de potencia para su control. Recordar que de usar una máquina de continua hubiese sido necesario rectificar la red alterna y de utilizar una máquina sincrónica es necesario alimentar la excitación con corriente continua.

i) Molienda SAG

Un molino SAG es un gran motor en el que en su interior se encuentra material a ser molido. Para ello, junto con el material, se colocan grandes bolas de acero, las que tienen la tarea de caer sobre el material para molerlo. Para que exista un gran control sobre la caída de las bolas de acero y éstas provoquen mejores resultados en la molienda, es que se necesita una máquina que mantenga una velocidad muy constante por un largo tiempo, pero que pueda ser modificada cuando, por ejemplo, las bolas de acero se hacen más pequeñas al irse rompiendo con el material. Además, esta velocidad debe ser muy lenta para que por gravedad las bolas de acero

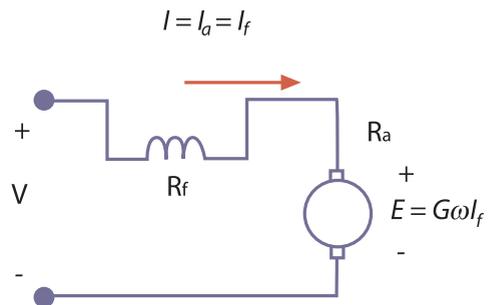
puedan caer cuando estén muy alto. De esta forma es necesario una máquina que mantenga su velocidad constante, y por lo tanto una **máquina sincrónica** pero que debe ser muy lenta y que pueda ser variable si cambian las características del sistema y por lo tanto es necesario utilizar electrónica de potencia en su alimentación para lograr este objetivo.

**P2** Dibuje las curvas torque velocidad de los siguientes motores:

- Motor CC conexión serie
- Motor CC conexión shunt
- Motor de inducción
- Motor sincrónico

**Solución**

a) La curva torque velocidad de un motor CC conexión serie está dada por las siguientes ecuaciones:

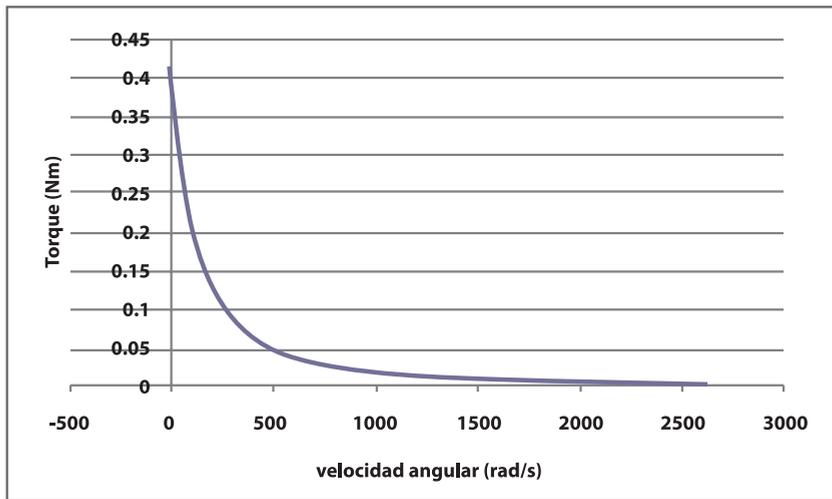


$$V = (R_a + R_f)I + E \quad P = E \cdot I$$

$$E = G\omega I_f \quad T = \frac{P}{\omega}$$

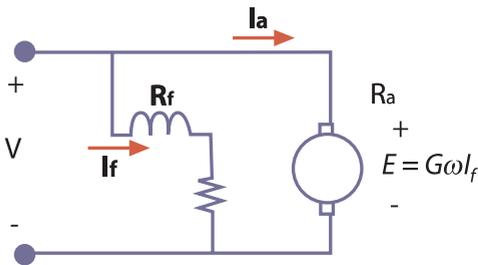
$$\Rightarrow T = GI^2 = \frac{GV^2}{(R_a + R_f + G\omega)^2}$$

Y por lo tanto la curva torque velocidad es de la forma:



b) Motor CC conexión shunt

La curva torque velocidad de un motor CC conexión serie está dada por las siguientes ecuaciones:



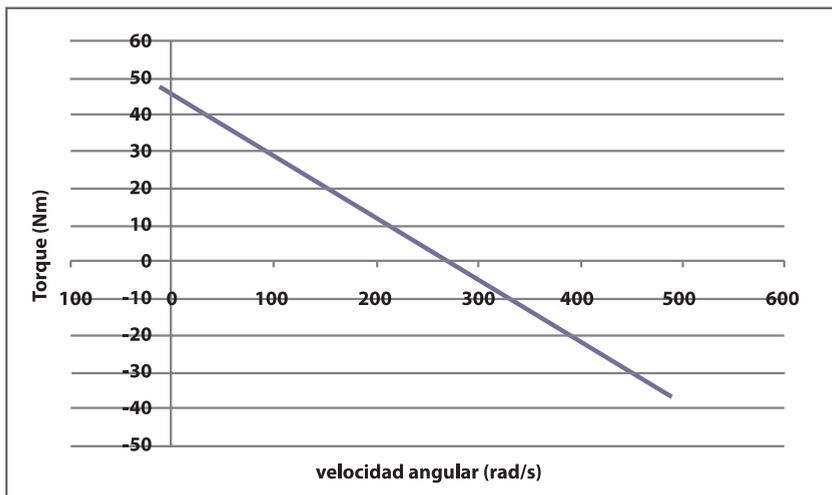
$$V = R_a I_a + E \quad P = E \cdot I$$

$$E = G\omega I_f \quad T = \frac{P}{\omega}$$

$$I_f = V/R_f$$

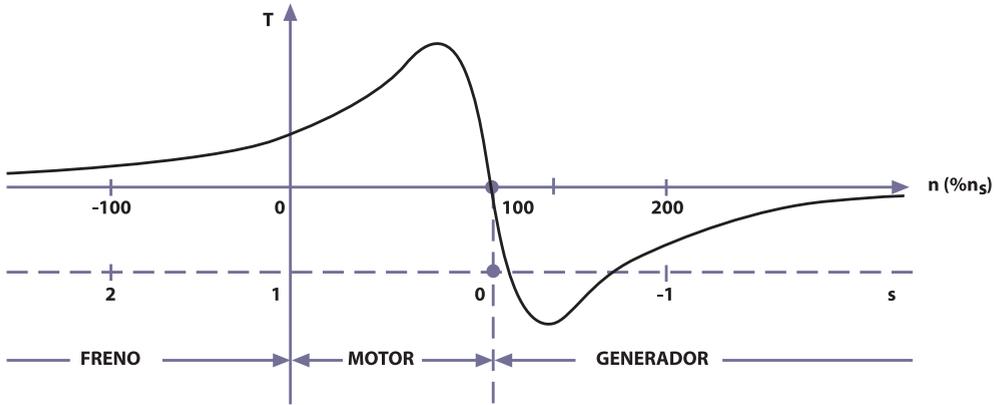
$$\Rightarrow T = G I_a I_f = \frac{GV}{R_f R_a} \left( V - \frac{G\omega V}{R_f} \right)$$

Y por lo tanto la curva torque velocidad es de la forma:



c) Motor de inducción

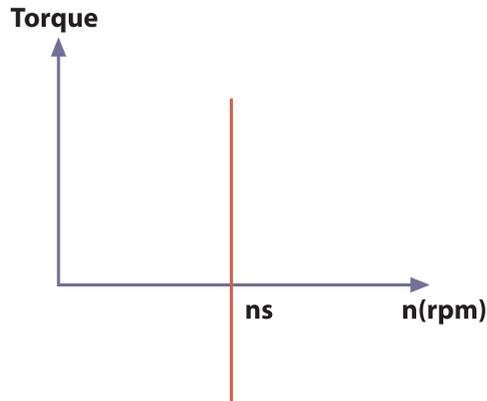
La curva torque-velocidad de la máquina de inducción es la siguiente:



En que  $n$  corresponde a la velocidad de giro en [rpm], y  $n_s$  es la velocidad sincrónica. Por lo tanto es importante ver que a la velocidad sincrónica ( $100\% n_s$ ), el torque es NULO.

d) Motor sincrónico

La curva torque-velocidad de la máquina sincrónica es la siguiente:



Es decir, solamente gira a la velocidad sincrónica y girando a esa velocidad puede entregar cualquier torque. Los valores de torque están limitados por operación técnica de la máquina, es decir, por límites de temperatura, estabilidad, etc.

**P3** En una papelería se posee un motor C.C. conexión shunt para mover una correa transportadora. Este tipo de procesos necesita estar a una velocidad lo más constante posible para no romper el material. La velocidad de operación debe ser estrictamente

480[rpm]. La máquina, alimentada con 220[V], tiene una resistencia de armadura  $R_a = 3,9[\Omega]$ , una resistencia de campo  $R_f = 452,6[\Omega]$  y una inductancia rotacional  $G = 1,66[H]$ . El torque resistivo de la carga varía con respecto a la velocidad angular de giro de la forma:

$$T_R = 0,2 + 7 \cdot 10^{-2} \omega + 3 \cdot 10^{-3} \omega^2 [Nm]$$

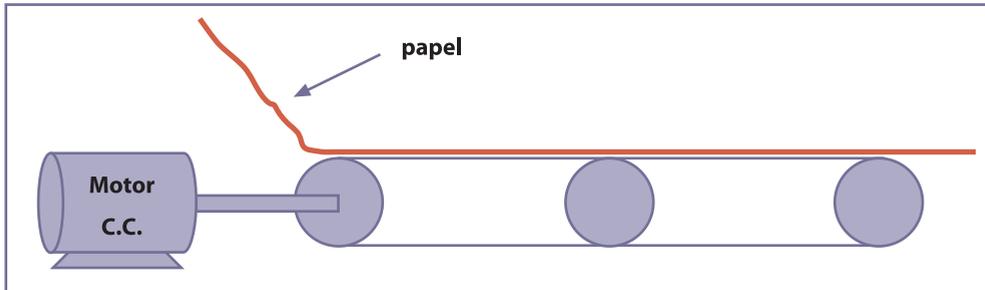


Ilustración 12: Ilustración auxiliar del P3

- a) Si la máquina operara sin ningún implemento extra:
  - i. ¿Cuál sería la velocidad de operación en [rpm]?
  - ii. ¿Es recomendable utilizar de esta forma la máquina de acuerdo a las condiciones de operación?
  - iii. ¿Cuál es el torque que debe entregar la máquina en esta condición de operación?
- b) Proponga un control reostático para lograr hacer funcionar correctamente la máquina:
  - i. Dimensione los implementos necesarios.
  - ii. Calcule la eficiencia del sistema en este caso.
  - iii. ¿Qué sucedería si por algún motivo se desconectaría el enrollado de campo?

Responda analíticamente.

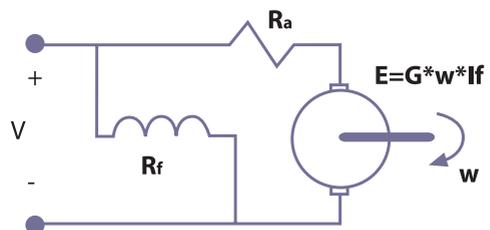
- Datos del motor CC (shunt):

$$V = 220[V], \quad R_a = 3.9[\Omega]$$

$$R_f = 452.6 [\Omega], \quad G = 1.66 [H]$$

- Torque resistivo de la carga:

$$T_R = 0.2 + 0.07 \omega + 0.003 \omega^2 [Nm]$$



### Solución

- a) Si la máquina opera sin ningún implemento extra:

$$I_f = \frac{V}{R_f} = 0.4861[A]$$

$$T_M = \frac{G I_f}{R_a} (V - G \omega I_f) = 45.5189 - 0.1670 \omega [Nm]$$

- i. Haciendo  $T_M = T_R$  se obtiene la velocidad de operación:  $\omega = 89.6 \text{ [rad/s]} = 855.6 \text{ [rpm]}$ .
- ii. Por lo tanto, no es apropiado usar la máquina de esta forma, ya que se requiere que la velocidad de operación sea  $\omega^* = 480 \text{ [rpm]} = 50.27 \text{ [rad/s]}$ .
- iii. A velocidad  $\omega^*$ , el torque suministrado por el motor debería ser igual al torque resistivo de la carga:  $T_M = T_R(\omega^*) = 11.3 \text{ [Nm]}$ . Sin embargo, se está entregando un torque de  $T_M(89.6) = 30.6 \text{ [Nm]}$ .

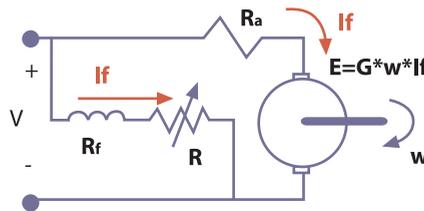
b) Se propone un control reostático en el enrollado de campo (agregar una resistencia en serie al enrollado):

Se tiene que el torque motriz viene dado por  $T_M = \frac{G I_f}{R_a} (V - G \omega I_f)$ . Se debe imponer que a velocidad  $\omega^*$ ,  $T_M = 11.3 \text{ [Nm]}$ . Para esto, a velocidad  $\omega^*$ , se tiene que el torque en función de la corriente de campo es:

$$T_M = 93.6410 \cdot I_f - 35.5190 \cdot I_f^2 = 11.3 \text{ [Nm]}$$

$$\Rightarrow I_f = 0.1268 \text{ [A]}$$

Obs: la otra solución para  $I_f$  es mayor que el caso sin reóstato, por lo que es imposible alcanzarla, ya que requeriría reducir la resistencia en el campo (lo que NO se puede lograr colocando una resistencia en paralelo).



- i. Como la conexión es shunt, la corriente de campo viene dada por  $I_f = \frac{V}{R_f + R}$ . Luego,  $I_f = 0.1268 \text{ [A]}$  para una resistencia de reóstato  $R = 1282.4 \text{ [\Omega]}$ . En este caso se tiene:

$$220 \text{ [V]} = 3.9 \text{ [\Omega]} \cdot I_a + 1.66 \text{ [H]} \cdot 50.27 \text{ [rad/s]} \cdot 0.1268 \text{ [A]}$$

$$I_a = 53.6971 \text{ [A]}, \quad E = 10.5812 \text{ [V]}$$

$$P_{in} = V \cdot (I_a + I_f) = 11841.26 \text{ [W]}$$

$$P_{out} = E \cdot I_a = 568.18 \text{ [W]}$$

- ii. Con lo que la eficiencia resulta ser de:  $\eta = 4.8\%$

Lo que era de esperarse debido a las pérdidas en la resistencia que se agrega al sistema.

- iii. Si se llegara a desconectar el enrollado de campo:

$$I_f = 0 \Rightarrow E = G \omega I_f = 0 \Rightarrow P_{out} = I_a \cdot E = 0 \Rightarrow T_M = \frac{P_{out}}{\omega} = 0$$

El torque motriz se hace cero. Luego, esta curva de torque resistivo frena la máquina, hasta llegar a un punto en que  $T_R = T_M = 0$ . De la ecuación de  $T_R$ , si la máquina va disminuyendo su velocidad, el primer punto con torque nulo que encuentra es a velocidad  $\omega = -3.333[\text{rad/s}] = -31.83 [\text{rpm}]$  (invierte sentido de giro).

El análisis anterior es válido para el régimen permanente. En el transitorio se debe considerar que debido a los flujos remanentes, la tensión interna E se mantiene un momento, con lo cual hay un instante durante el cual se entrega potencia activa al eje, aún sin corriente de campo. Para esto, se modela la desconexión como un incremento constante de la resistencia de campo hasta el infinito (o caída constante de la corriente de campo hasta cero).

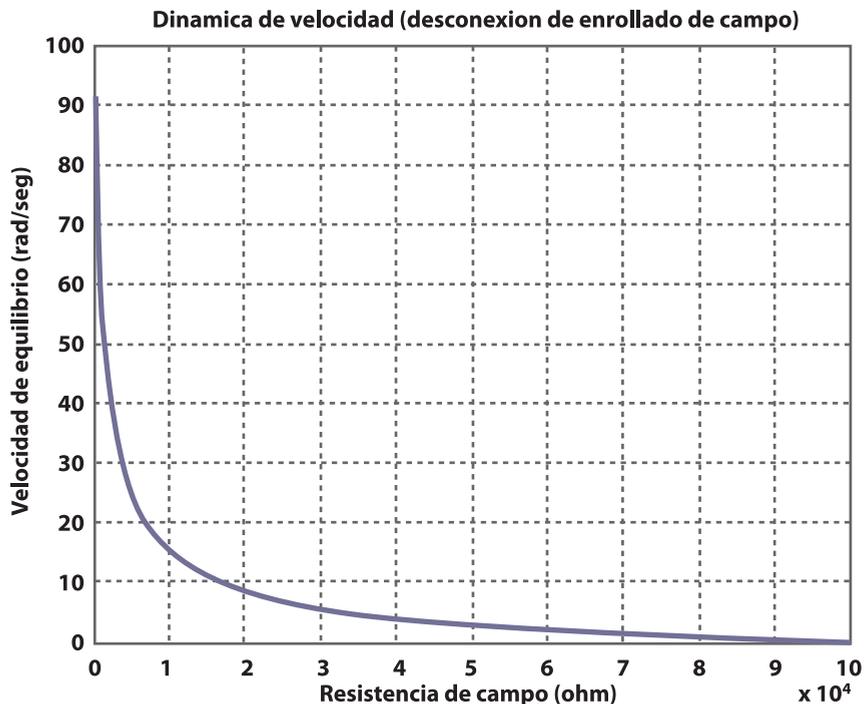
El torque motriz como función de la velocidad y la corriente de campo es:

$$T_M = 93.641 \cdot I_f - 0.7066 \cdot I_f^2 \cdot \omega$$

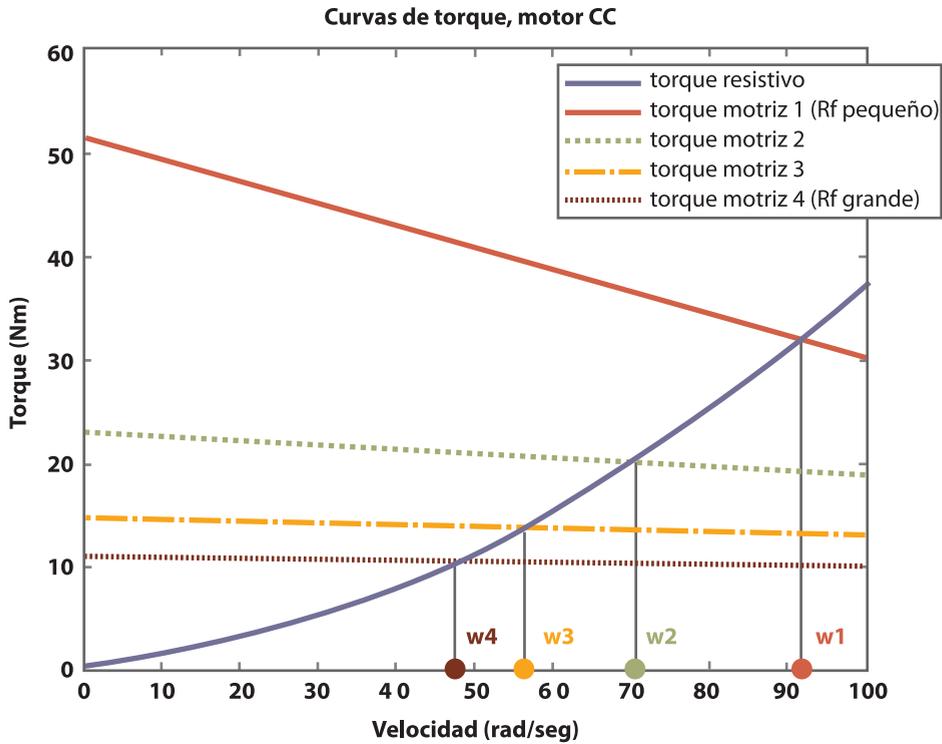
Si se interseca esta curva con la de torque resistivo, la velocidad de equilibrio parametrizada en  $I_f$  es:

$$\omega_{eq} = \frac{-(0.07 + 0.7066I_f^2) + \sqrt{(0.07 + 0.7066I_f^2)^2 - 4 \cdot 0.003 \cdot (0.2 - 93.641I_f)}}{2 \cdot 0.003}$$

Para evitar derivar: se observa que dada una corriente de campo positiva, un incremento de esta hace crecer en más medida el valor de la raíz que el valor que se resta. Luego, la velocidad es función creciente de  $I_f$  (y función decreciente de  $R_f$ ). Con lo que  $\omega$  en función de  $R_f$  resulta de la forma:



Así, la velocidad decrece a medida que aumenta la resistencia de campo, lo que significa que en el transiente el motor tendrá la misma tendencia que en régimen permanente: a frenarse. Este hecho puede verse en las curvas de torque de forma más sencilla. Si se grafica la curva de torque resistivo y sucesivas curvas de torque motriz con  $I_f$  decreciente, se verá en qué puntos se van intersectando.



Se debe recordar que este último análisis es transiente, y que finalmente el motor termina en el punto de equilibrio donde el torque resistivo se hace nulo.