

Instituto Politécnico

Universidad Nacional de Rosario Universidad Nacional de

UNIDAD 6: Máquina Sincrónica

Accionamientos
Electromecánicos

Masterización: RECURSOS PEDAGÓGICOS



5º Año

Cód. 21507-19

Felipe de la Torre



Dpto. de Electrotecnia



Contenidos

Contenidos	1
Introducción	2
Elementos constitutivos	2
Funcionamiento como generador	7
Funcionamiento como motor	10
Curva torque vs velocidad	12
Arranque.....	14
Arranque con motor auxiliar	14
Arranque con devanado amortiguador.....	15
Arranque con variador de frecuencia	16
Aplicaciones	17
Bibliografía.....	19
Libros	19
Sitios WEB	19

Máquina sincrónica

Accionamientos Electromecánicos

Introducción

En esta Unidad veremos la **máquina sincrónica** en su funcionamiento como **motor** y **generador**. Su uso más común es como generador, lo vamos a encontrar en las centrales de generación eléctrica hidráulicas, térmicas y nucleares.

Elementos constitutivos

El primer elemento es el **estator**. Al igual que en la máquina asincrónica, el estator aloja un devanado o bobinado trifásico. Esto quiere decir 3 bobinas desfasadas 120° en el espacio.



Bobinado estatórico

Máquina sincrónica pequeña

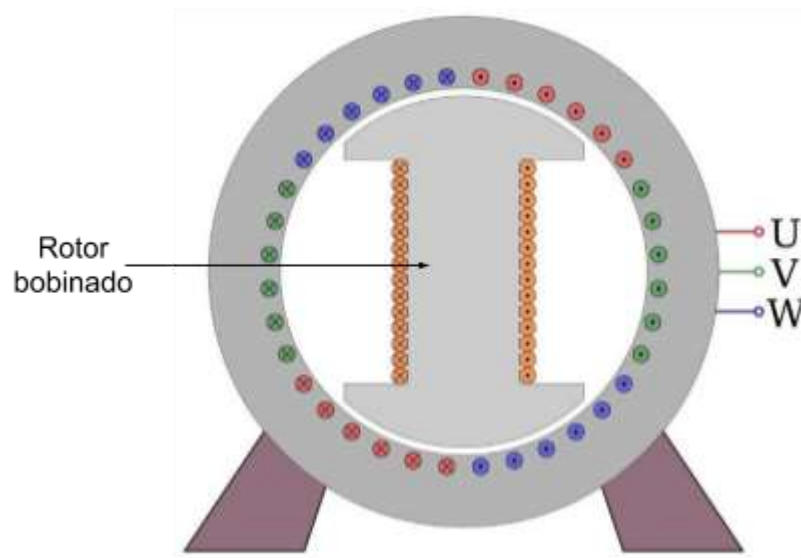


Bobinado estatórico

Máquina sincrónica en construcción

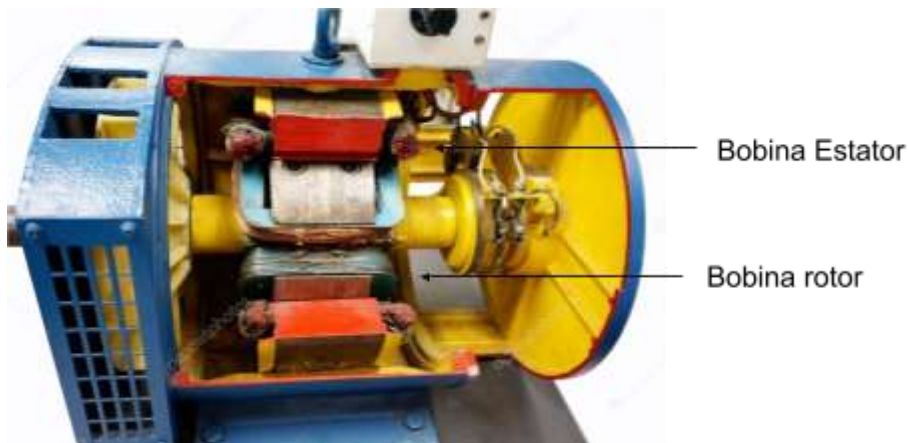


El segundo elemento es el **rotor**. Acá empezamos a notar diferencias con respecto a la máquina asincrónica. En este caso ya no tenemos un rotor jaula de ardilla, sino que el **rotor posee su bobinado**. Esto se observa en el siguiente esquema:



Esquema máquina síncrona

Por un lado, vemos el bobinado trifásico del estator, cada fase (U, V, W) posee un color distinto y por otro lado vemos que el rotor también tiene un bobinado.



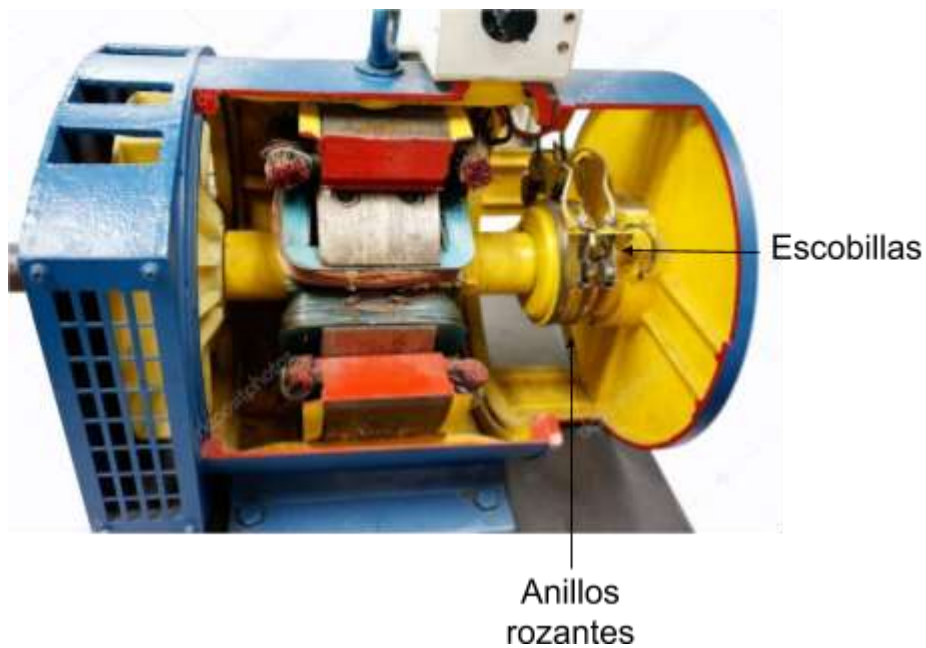


Rotor bobinado

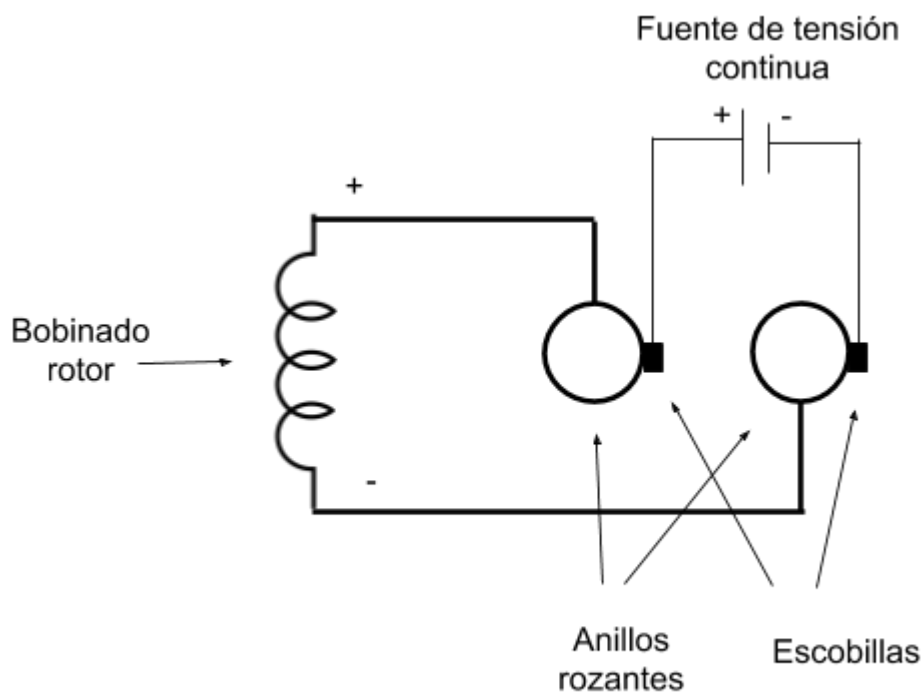
El bobinado rotórico se conecta a una **fuentes de tensión continua** y circula por él corriente continua. Como el rotor va a estar girando no se puede conectar la fuente de tensión al bobinado del rotor simplemente por medio de cables. Si hacemos esto, cuando el rotor gire los cables se van a enredar y romper. Para solucionar este problema se utilizan **anillos rozantes** y **escobillas**.



Anillos rozantes



La bobina del rotor está conectada a los anillos rozantes que giran junto al rotor. El positivo de la bobina va a uno de los anillos y el negativo al otro anillo (recordar que se alimenta con corriente continua). En el siguiente esquema se observa la conexión:



Esquema de conexión

Máquina sincrónica

Accionamientos Electromecánicos

Las escobillas son unos **bloques de grafito** que se apoyan sobre los anillos rozantes:



Zoom escobillas
+ anillos rozantes



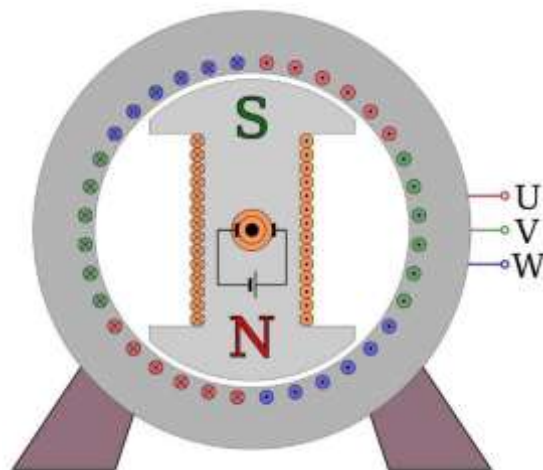
Escobillas de grafito

Este sistema permite conectar eléctricamente una parte móvil (la bobina del rotor) con una parte fija (fuente de tensión continua). Esta fuente de tensión continua se la llama **excitación**. Existen diferentes soluciones tecnológicas para implementar la excitación, pero no serán detalladas en este curso.

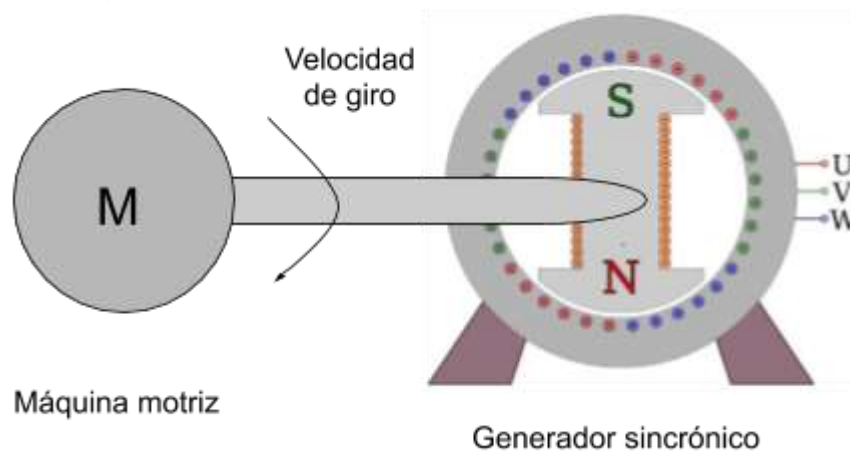


Funcionamiento como generador

Como se mencionó anteriormente, el rotor posee un bobinado que es alimentado por corriente continua. Esto transforma el rotor en un **electroimán**. Como la corriente es continua el campo magnético no varía. Se genera un polo norte y otro sur como se ve en la siguiente figura



A continuación, se conecta el eje del rotor a otra máquina que lo haga girar como, por ejemplo: una turbina de agua, una turbina de vapor o una turbina de gas. Estamos hablando de motores que son propulsados por una fuerte presión de agua, de vapor o la combustión del gas. De forma general las llamamos máquinas motrices. El esquema de conexión sería el siguiente:



Máquina sincrónica

Accionamientos Electromecánicos

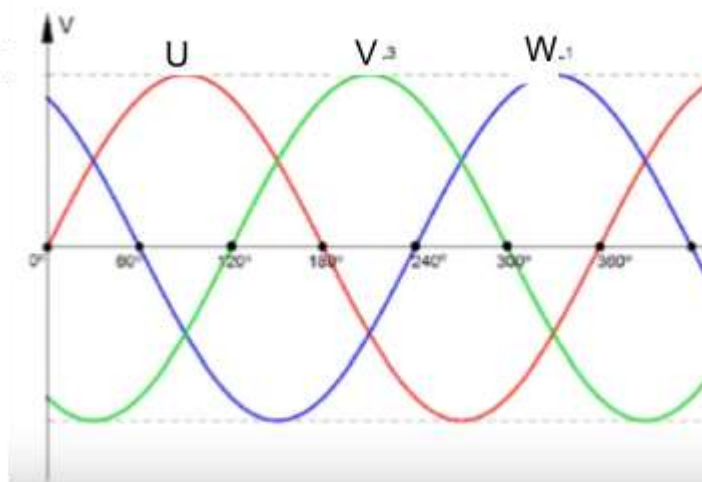
Antes de continuar recordemos que si al bobinado trifásico del estator se lo alimenta con una fuente de tensión trifásica alterna se obtiene un campo magnético giratorio como se observa en el siguiente GIF.



La velocidad a la que gira el campo magnético depende de la frecuencia de la alimentación trifásica (50 Hz en Argentina)

En el caso del generador sincrónico la situación es al revés. El campo magnético giratorio no lo genera la bobina del estator, sino que lo genera la bobina del rotor.

El campo magnético giratorio produce una variación de flujo magnético en las bobinas del estator. Esto induce una fem en las bobinas del estator (Ley de Faraday). Las fems inducidas en el estator conforman un sistema trifásico que varía según la velocidad de giro del rotor. Esto quiere decir, que si se controla la velocidad a la que gira el rotor es posible generar un sistema trifásico de 50 Hz en el estator. Este es el principio de funcionamiento de un generador sincrónico. En el siguiente esquema vemos las tensiones que se generan en el estator:



Sistema de tensiones trifásicas

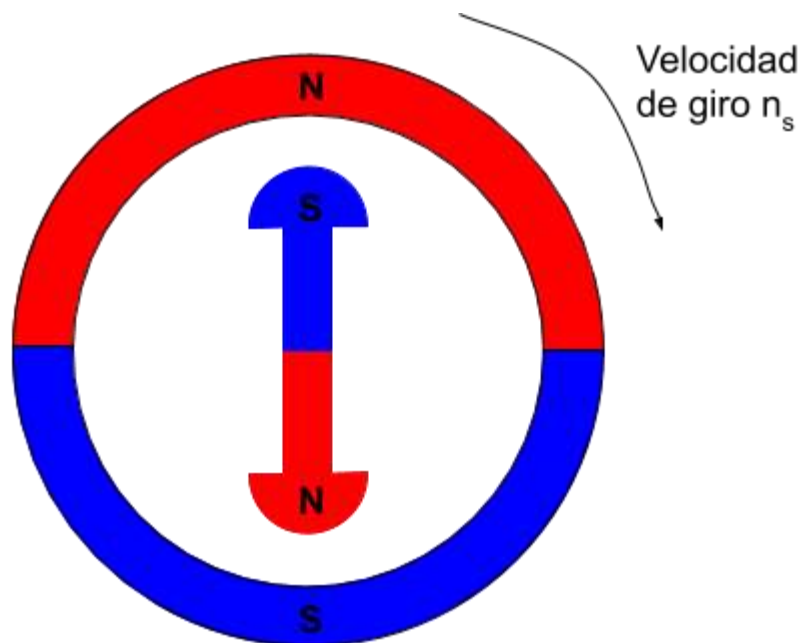
Por lo tanto, la frecuencia a la que gira el rotor, la frecuencia a la que gira el campo magnético giratorio (que genera el rotor) y la frecuencia de las fems inducidas en los bobinados estáticos es la misma. Es por esto que se lo llama **generador sincrónico**

En la siguiente imagen podemos ver un ejemplo de una central hidráulica:



Funcionamiento como motor

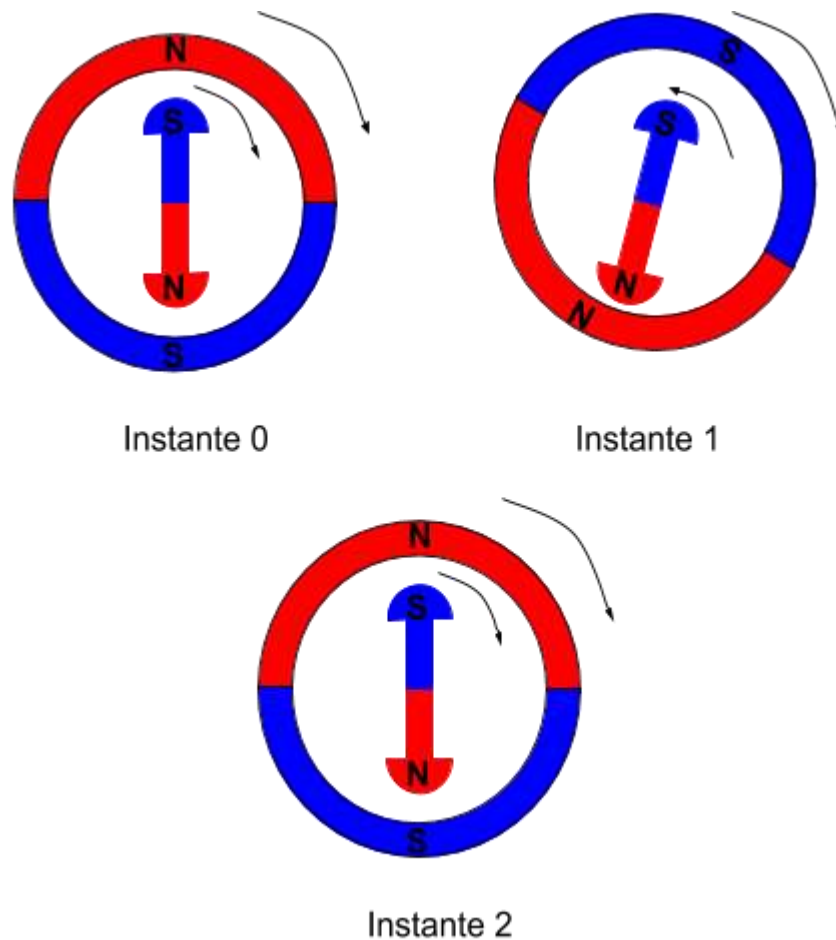
Para que la máquina sincrónica funcione como **motor sincrónico** se alimenta el rotor con corriente continua (igual que en el funcionamiento como generador) y se alimentan las bobinas del estator con un sistema trifásico. Entonces tenemos dos campos magnéticos, por un lado, el **campo magnético giratorio** que produce el **estator** y el campo magnético que genera el rotor. **Se puede pensar** que se tienen dos imanes dentro de la máquina: uno circular que gira a la velocidad sincrónica (el del estator) y un imán de barra que puede girar (el del rotor). Esto se esquematiza en la siguiente imagen:



Esquema de un motor sincrónico pensando a los campos magnéticos como imanes permanentes

Entre estos dos imanes se van a establecer fuerzas de atracción y repulsión. Polos opuestos se atraen y polos iguales se repelen.

Analicemos qué ocurre si el rotor está detenido. El imán circular está girando con una frecuencia igual a 50 Hz. En algunos momentos va a atraer al imán del rotor a girar en un sentido y en otros momentos en otro sentido. Esto ocurre ya que el imán circular está girando a una gran velocidad, veamos un ejemplo:



En el **instante 0** el polo norte del estator atrae al polo sur del rotor, por lo cual el rotor comienza a girar en el mismo sentido. En el **instante 1** el rotor apenas si se movió, sin embargo, el campo magnético del estator ya dio más de media vuelta, en este momento el polo sur del estator repele al polo sur del rotor haciendo que el mismo gire en sentido contrario. El **instante 3** es igual al instante 0. **En conclusión, el motor no logra arrancar por sí solo.** Simplemente queda vibrando. Esto da la pauta de que es necesario un método particular para arrancar el motor sincrónico, más adelante lo describiremos.

Ahora imaginemos que por algún motivo externo se lleva al rotor a girar a la misma velocidad que el campo magnético giratorio del estator, o sea a la velocidad sincrónica. Recordemos que si la frecuencia del sistema trifásico que alimenta el estator es de 50 Hz la velocidad sincrónica es:

$$n_s = 50 \times 60 = 3000 \text{ rpm}$$

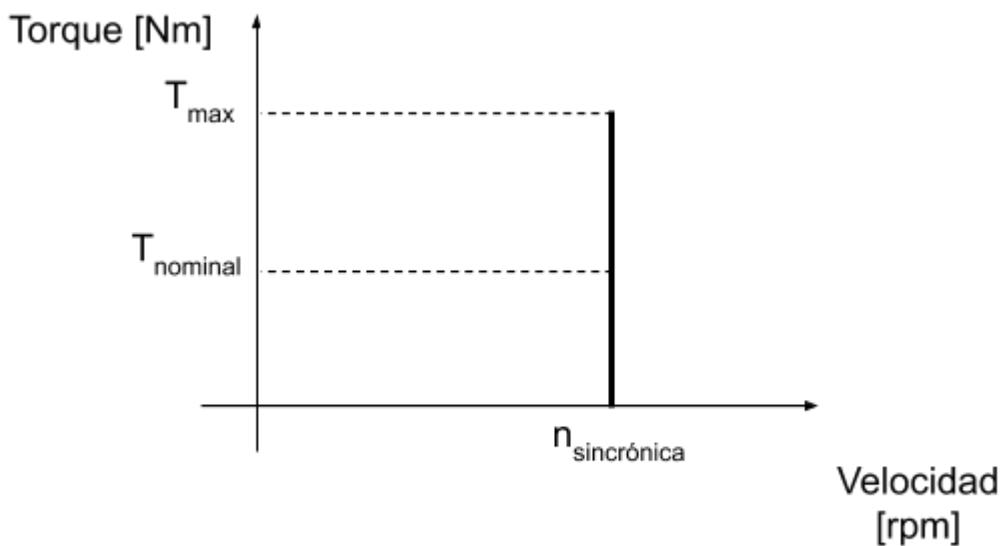
Máquina sincrónica

Accionamientos Electromecánicos

Entonces tanto el imán circular, generado por el estator, como el imán de barra, generado por el rotor, están girando a la misma velocidad. En esta situación se produce un **enganche magnético** entre los dos campos magnéticos. El polo norte del estator se “engancha” con el polo sur del rotor y viceversa. En esta condición el campo magnético del estator arrastra al rotor y es así como la máquina funciona como motor sincrónico.

Tanto el campo magnético giratorio (generado por el estator), como el rotor giran a la misma velocidad, es por esto que se conoce a esta máquina como motor sincrónico. Si por algún motivo la velocidad es menor o mayor a la sincrónica, se produce un “desenganche magnético” y empieza a ocurrir algo similar a cuando el rotor estaba detenido: por momentos el campo magnético del estator va a atraer al del rotor y en otros momentos lo va a repeler.

Curva torque vs velocidad

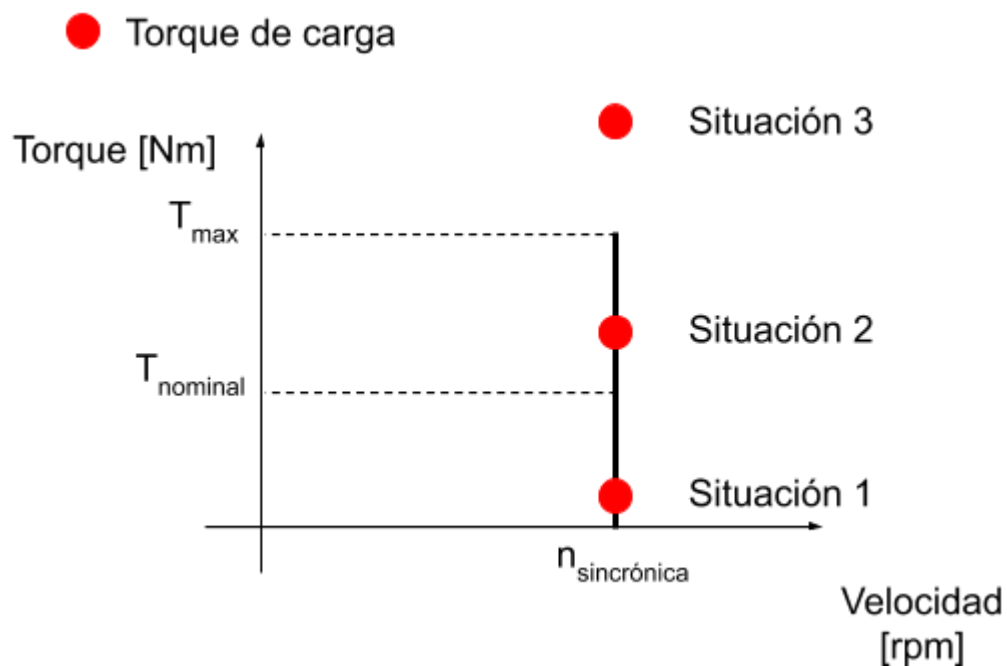


Torque vs velocidad

Como vemos en la curva siempre que el rotor gire a la velocidad sincrónica el motor va a poder generar un torque que va desde cero hasta el torque máximo. Para entender mejor esta curva, pensemos en el siguiente ejemplo: en una minera tenemos una cinta transportadora para los minerales extraídos.



Es importante que la velocidad de la cinta se constante, sin importar cuán cargada esté la misma. De esta forma el proceso es constante y no se producen cuellos de botella. Supongamos que inicialmente la cinta está en funcionamiento, pero no hay piedras cargadas (situación 1). Luego se deposita una cantidad de piedras sobre la cinta (situación 2), en este momento el **torque de carga** o **torque resistente** aumenta. El motor debe ejercer un torque mayor para continuar a la misma velocidad. En la situación 3 se depositan demasiadas piedras y el motor no logra mover la cinta transportadora. Veamos esto en el siguiente gráfico:



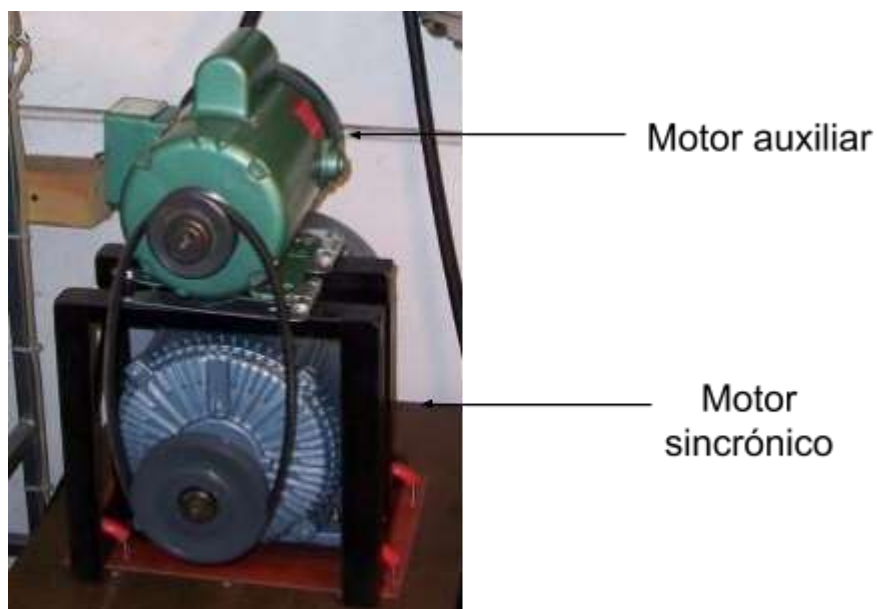
Arranque

Para que el motor pueda funcionar es necesario llevar el rotor desde su estado en reposo a la velocidad sincrónica. Veremos tres métodos distintos:

- Arranque con motor auxiliar
- Arranque mediante devanado de amortiguación
- Arranque con variador de frecuencia

Arranque con motor auxiliar

Primero se desconecta la fuente de tensión continua que alimenta el rotor del motor sincrónico y se conecta el estator a una alimentación trifásica. Luego se conecta el eje del rotor a otro motor como puede ser un motor de inducción (motor auxiliar). Se pone en funcionamiento el motor de inducción que hace girar al rotor del motor sincrónico a una velocidad muy cercana a la sincrónica. En ese momento se conecta la fuente de tensión continua, por lo que el rotor del motor sincrónico se transforma en un electroimán y se produce el enganche magnético entre el campo magnético del estator y el del rotor. Finalmente se alcanza una velocidad constante e igual a la sincrónica, ya es posible desconectar el motor auxiliar.





Arranque con devanado amortiguador

Este es el arranque más popular y consiste en colocar unas barras, como las del rotor jaula de ardilla, en las caras del rotor del motor sincrónico.



Bobinado del rotor



Accionamientos Electromecánicos

Estas barras le permiten arrancar al motor como si fuera un motor asincrónico. El campo magnético giratorio del estator induce corrientes en las barras y estas corrientes interactúan con el mismo campo giratorio generando fuerzas que hacen girar el motor (Ver funcionamiento del motor de inducción en la Unidad 4).

Al igual que en el arranque anterior, al principio no se conecta la fuente de tensión continua al devanado del rotor. Cuando el rotor alcanza una velocidad muy cercana a la sincrónica se conecta la fuente de tensión continua al bobinado del rotor y se produce el **enganche magnético**. En el momento en que el rotor alcanza la velocidad sincrónica, ya no se inducen más corrientes en las barras del devanado amortiguador. Esto se debe a que la velocidad relativa entre las barras y el campo magnético giratorio es cero, por lo tanto, no hay variación del flujo magnético enlazado.

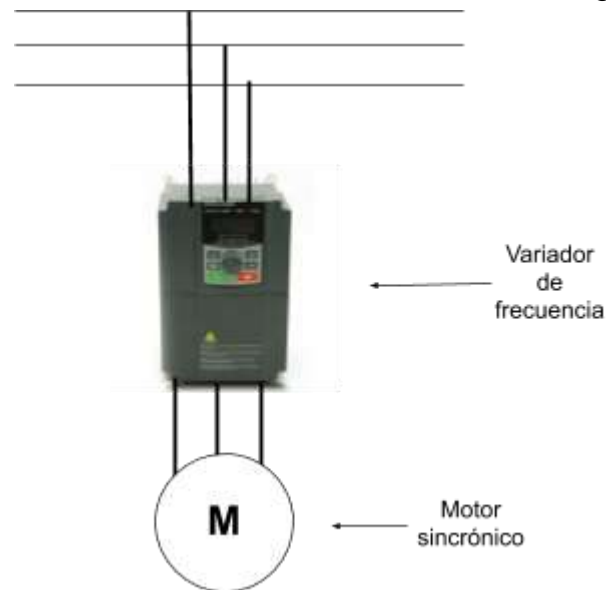
Arranque con variador de frecuencia

El **variador de frecuencia** es un dispositivo de la electrónica de potencia que ya se ha mencionado en la “Unidad 4: Motor de inducción”. Permite variar la frecuencia con la que se alimenta el estator del motor sincrónico. Al variar esta frecuencia también se modifica la velocidad con la que gira el campo magnético producido por el estator.

Entonces, si en vez de con 50 Hz se alimenta con una frecuencia más pequeña, el campo magnético girará lo suficientemente lento para que se produzca el enganche magnético entre el campo magnético giratorio del estator y el electroimán del rotor. Luego se sube progresivamente la frecuencia de alimentación y la velocidad del rotor también aumenta progresivamente.



Un esquema del conexionado del variador de frecuencia es el siguiente:



Aplicaciones

El motor sincrónico se utiliza dentro de la industria en aplicaciones que requieran una velocidad constante para distintos valores de carga.

Son ejemplos:

- Trituradoras, molinos y cintas transportadoras en la minería
- Ventiladores, bombas y compresores en la siderurgia
- Bombas en el tratamiento de aguas residuales
- Compresores y ventiladores de alta capacidad en las industrias química
- Laminadora y extrusoras



Trituradora



Laminadora



Bibliografía

Libros

Mora J. F. (2003), *Máquinas Eléctricas*

Chapman S. J., *Máquinas Eléctricas*

Sitios WEB

<https://www.learnengineering.org/>