

Instituto Politécnico

Universidad Nacional de Rosario Universidad Nacional de

UNIDAD 4: Motor Asíncrono o de Inducción

5º Año

Accionamientos
Electromecánicos

Cód. 21505-19

Felipe de la Torre



Dpto. de Electrotecnia

Masterización: RECURSOS PEDAGÓGICOS



Contenidos

Contenidos	1
Introducción	2
Elementos constitutivos	2
Principio de funcionamiento.....	4
Balance de potencias	6
Unidades de potencia	8
Torque de rotación	9
Tipos de carga.....	10
Carga constante.....	10
Carga variable con la velocidad	13
Zonas de estabilidad e inestabilidad.....	14
Arranque.....	15
Arranque directo	16
Arranque Estrella-triángulo	16
Arranque suave.....	18
Comparación.....	20
Regulación de la velocidad (Variador de frecuencia)	22
Aplicaciones del motor de inducción	23
Bibliografía.....	25
Libros	25
Sitios WEB	25

Motores asincrónicos o de inducción

Accionamientos Electromecánicos

Introducción

Los motores eléctricos son máquinas que transforman la energía eléctrica en movimiento (energía cinética). A lo largo de la historia se han inventado diferentes tipos de motores eléctricos, en este apunte presentamos el motor asincrónico que también es conocido como motor de inducción.

Estos motores se encuentran a lo ancho y largo de todas las industrias. Son motores de construcción simple y robusta, económicos y fáciles de mantener.

Video recomendado para ver antes y después de finalizar la lectura:

<https://www.youtube.com/watch?v=OITDyL6ZPOY>

Elementos constitutivos

En la siguiente imagen tenemos una vista general de todos los elementos que constituyen el motor de inducción:





Los dos elementos más importantes son el **estator** y el **rotor**. El estator se encuentra fijado en la carcasa del motor y no tiene movimiento. En el mismo se coloca un bobinado o devanado trifásico desfasado 120° en el espacio.



Carcasa

Estator (Devanado trifásico)

El **rotor** es un cilindro que se coloca dentro del estator y que tiene la posibilidad de rotar.

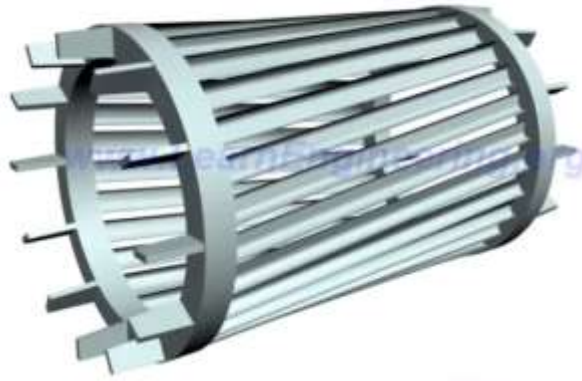


Rotor

Motores asincrónicos o de inducción

Accionamientos Electromecánicos

En general se lo conoce como **rotor jaula de ardilla** debido a su forma:



Principio de funcionamiento

En el estator se encuentra un devanado trifásico desfasado 120° en el espacio. Este devanado es alimentado por un sistema trifásico (de frecuencia f_1), esto induce un campo magnético giratorio dentro del motor.



La velocidad a la que gira el campo magnético se la conoce como **velocidad sincrónica** (n_1):



$$n_1 = f_1 \times 60 \text{ rpm (revoluciones por minuto)}$$

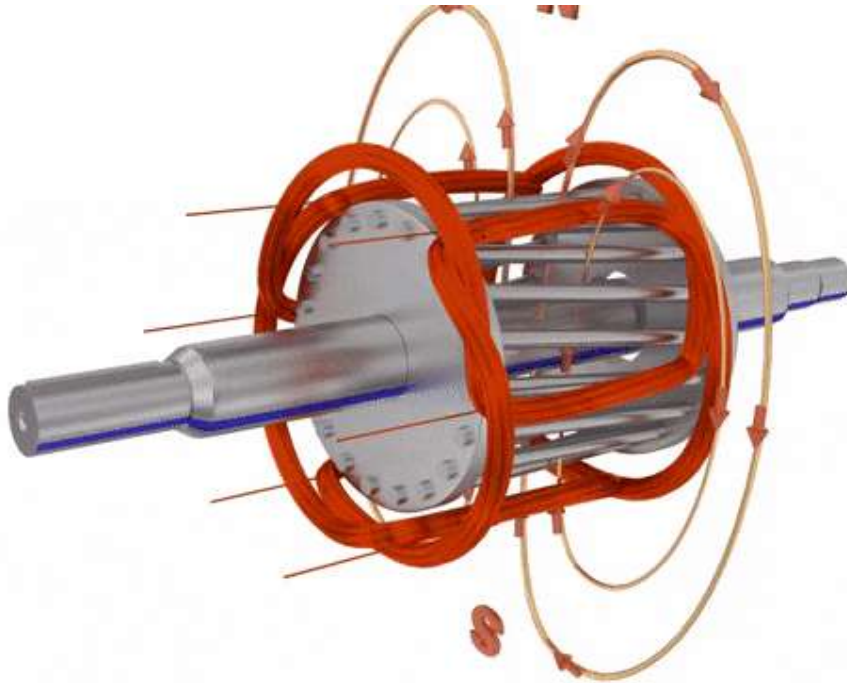
Si la frecuencia es de 50 Hz,

$$n_1 = 50 \times 60 = 3000 \text{ rpm}$$

Este campo magnético giratorio induce una fem en los conductores del rotor (ya que los conductores enlazan un flujo magnético variables, ley de Faraday). Esta fem inducida, genera una circulación de corriente en el rotor.

Ahora, el campo magnético giratorio interactúa con las corrientes de las barras del rotor, induciendo una fuerza que lo hace girar. La sumatoria de todas las fuerzas que aparecen en cada barra del rotor por el radio del rotor dan lugar a un **torque resultante** sobre el rotor, también conocido como **torque electromecánico**. Llamamos a la **velocidad de rotación del rotor n**





La velocidad del rotor irá aumentando progresivamente, pero, ¿Hasta qué límite? A medida que aumenta la velocidad del rotor, disminuye la **velocidad relativa** entre el rotor y el campo magnético giratorio, por lo tanto, disminuye la variación del flujo magnético enlazado por los conductores del rotor. Esto implica que disminuye la fem inducida en el rotor, disminuyen las corrientes inducidas en el rotor y por ende disminuye el torque que hace girar al rotor. En el caso de que la velocidad del rotor (n) sea igual a la de velocidad del campo magnético giratorio (n_1), la velocidad relativa entre el rotor y el campo es cero, lo que implica que la variación del flujo magnético enlazado por las barras del rotor es nulo. Por lo tanto, no hay fem inducida, no hay corrientes en el rotor y finalmente, no hay torque. **Es por esto que la velocidad del rotor (n) debe ser siempre menor a la del campo magnético giratorio (n_1).** Es por esto que se conoce al motor como **motor asincrónico** ya que no gira a la **velocidad sincrónica** (n_1).

Balance de potencias

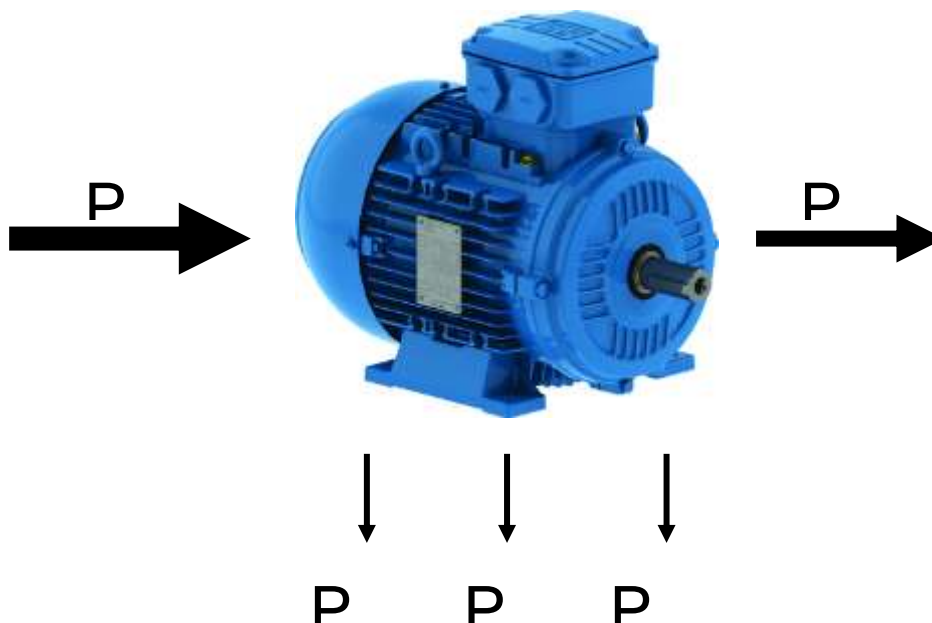
El motor es una máquina que transforma potencia eléctrica (**Pe**) en potencia mecánica (**Pm**). El caso ideal es que toda la potencia eléctrica se transforme en potencia mecánica. Sin embargo, existen pérdidas que hacen que la potencia mecánica sea menor a la potencia eléctrica. Vamos cuáles son estas pérdidas:



Pérdidas eléctricas por efecto Joule: Tanto el circuito del estator como el del rotor poseen una resistencia interna, esta resistencia provoca que a la circular corriente se disipe potencia en forma de calor.

Pérdidas magnéticas: No entraremos tanto en detalle, pero al generarse campos magnéticos variables, los dominios de los materiales ferrosos del motor se reorientan constantemente. Este proceso no es “gratis” si no que consume energía. Por otro lado, si bien la gran parte del campo magnético giratorio es enlazado por el rotor, existe una parte del mismo que no es enlazada por el rotor que se conoce como flujo de dispersión. Este flujo magnético no puede ser aprovechado y por lo tanto no se transforma en energía mecánica, sino que se pierde.

Pérdidas por rozamiento mecánico: Al girar el rotor genera rozamientos en los cuales se disipa potencia en forma de calor.



$$P_m = P_e - (P_{joule} + P_{mag} + P_{rozamiento})$$

El rendimiento del motor η se define como:

$$\eta = \frac{P_m}{P_e} \times 100$$

Motores asincrónicos o de inducción

Accionamientos Electromecánicos

A groso modo, el rendimiento de los motores de inducción varía entre 75% y 95%.
Dependiendo de la potencia del motor y el tipo de construcción.

Unidades de potencia

Dependiendo de si nos referimos a la potencia eléctrica o la mecánica se utilizan distintas unidades. Para la **potencia eléctrica** usamos el **kW**. Para la potencia mecánica suele utilizarse el **Caballo de fuerza Hp (Horse Power)** o el **Caballo de vapor (CV)**



$$1 \text{ Hp} = 0,746 \text{ kW}$$

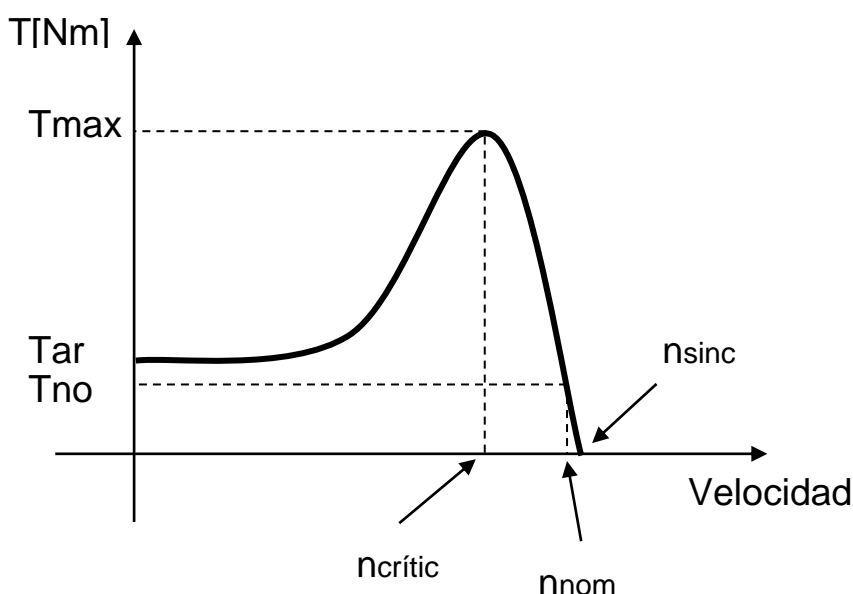
$$1 \text{ CV} = 0,736 \text{ kW}$$



Torque de rotación

En esta sección veremos y analizaremos la curva **torque vs velocidad**. El torque mecánico del motor, o sea la fuerza que hace girar al rotor, depende de diversos parámetros como la corriente en el rotor, la tensión en el estator y la forma de construcción de las barras del rotor.

La siguiente es una curva típica torque vs velocidad de un motor de inducción:



El torque se mide en “Newton x metro” [Nm] y la velocidad en “revoluciones por minuto” [rpm]. Algunos puntos de interés son los siguientes:

T_{nom}: Torque nominal. Es el torque que fija el fabricante de la máquina como valor ideal de trabajo. Esto quiere decir que la máquina fue construida para trabajar en ese punto. La velocidad que desarrolla el motor cuando el torque es igual al nominal se conoce como **velocidad nominal (n_{nom})**

T_{arr}: es el torque de la máquina en el momento del arranque.

T_{max}: Es el torque máximo que puede desarrollar la máquina y se da a la **velocidad crítica ($n_{crítica}$)**

Motores asincrónicos o de inducción

Accionamientos Electromecánicos

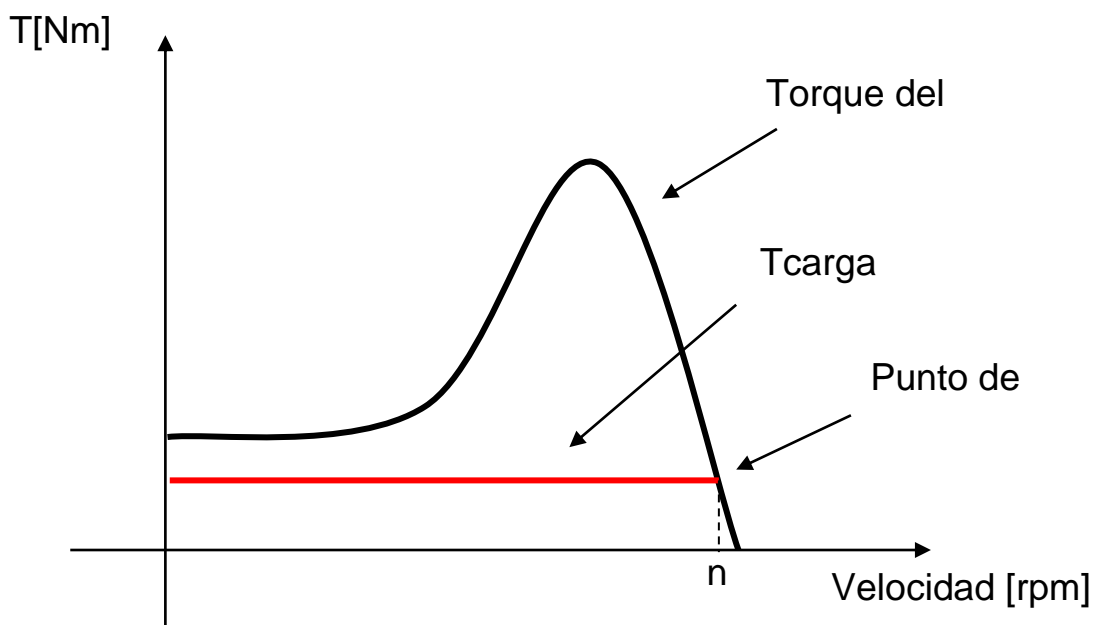
$n_{sincronica}$: Es la velocidad sincrónica. Notar que a esta velocidad el torque es nulo.

Tipos de carga

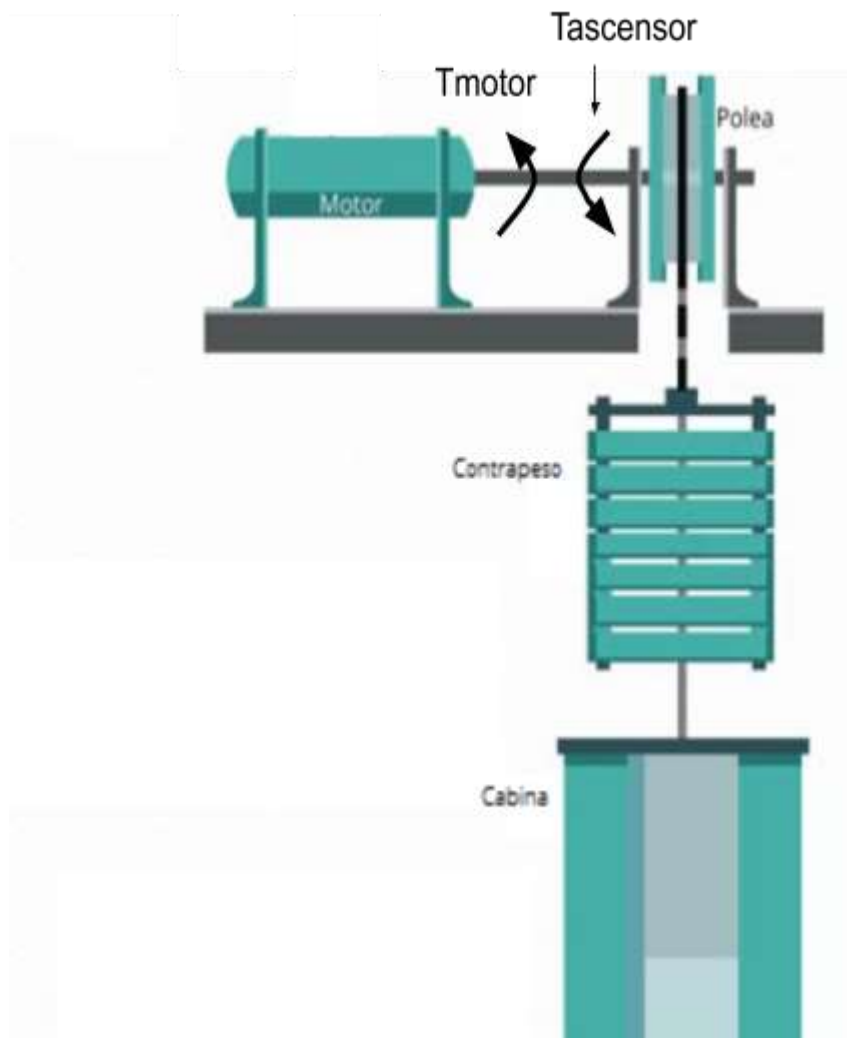
Los motores se utilizan para hacer girar una carga como puede ser: un ventilador, una cinta transportadora, grúas, ascensores etc. Al conectar la carga al motor, esta generará un torque resistente en el motor. Existen 2 tipos de cargas:

Carga constante

Es la carga cuyo torque resistente no varía con la velocidad, como: ascensores, grúas o montacargas.

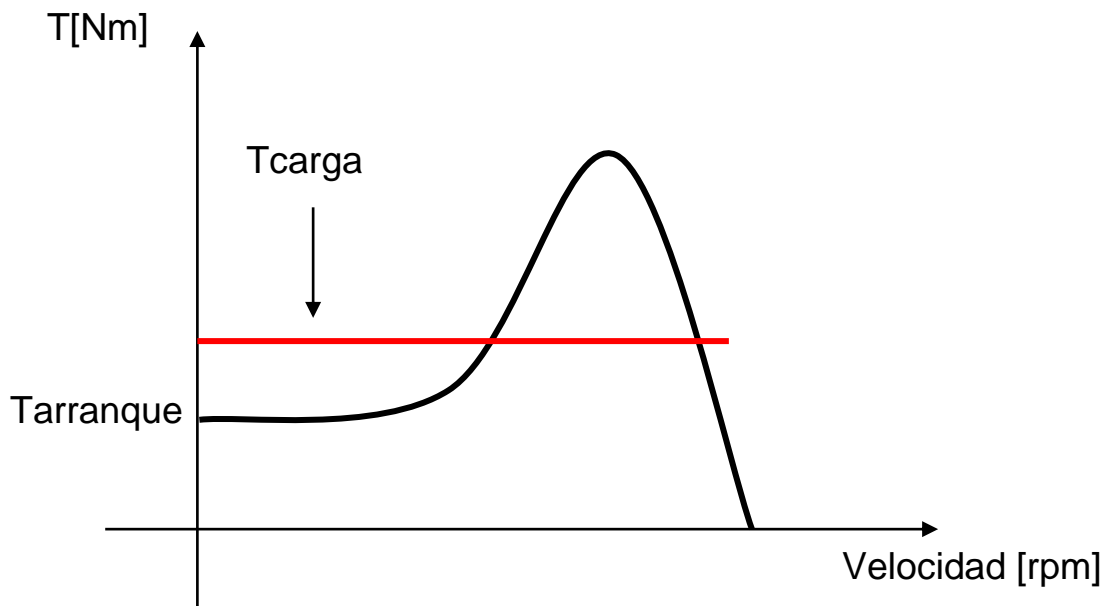


Para entender esta gráfica pensemos que tenemos un ascensor que es accionado por un motor de inducción como se observa en la siguiente imagen:

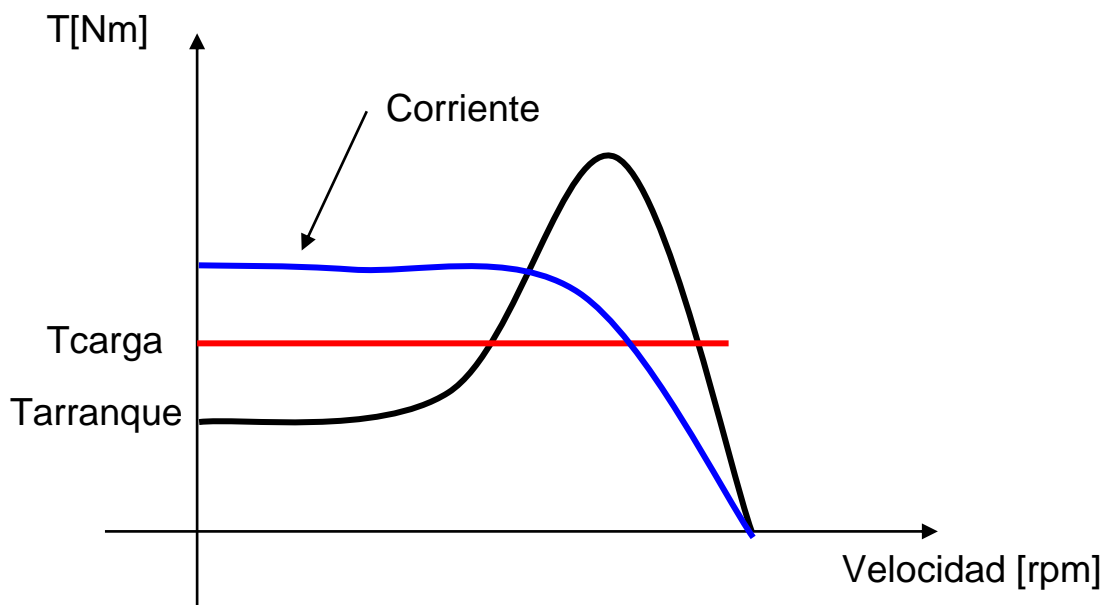


El torque de la carga (ascensor) tiene sentido contrario al del motor. Inicialmente el ascensor está detenido, por lo tanto, la velocidad del motor es cero ($n=0$ rpm), nos encontramos a la izquierda de la curva torque vs velocidad. El motor comienza a acelerar, la velocidad va aumentando y en todo momento el torque mecánico del motor T (curva negra) es mayor al torque de carga que genera el peso del ascensor (curva roja). Esta desigualdad es la que permite que el motor se siga acelerando y aumente su velocidad. Cuando se llega a la **velocidad de operación (n)** el torque de carga es igual al torque del motor, la sumatoria de torques da cero. Esto implica que la aceleración es nula y la velocidad es constante. Se lo llama punto de operación porque es a la velocidad y torque a la que se establecerá el funcionamiento del ascensor.

Veamos una situación distinta:



En este caso el torque de carga es mayor al torque de arranque, por ejemplo, porque al ascensor se subieron 10 personas en vez de 4, que es el máximo permitido. Por lo tanto, el motor no va a poder mover el ascensor, ya que no tiene la potencia necesaria. El motor hará el intento y, si ninguna protección lo desactiva, se quemará. Para entender por qué se quema el motor veamos la curva de la **corriente del motor vs la velocidad**:

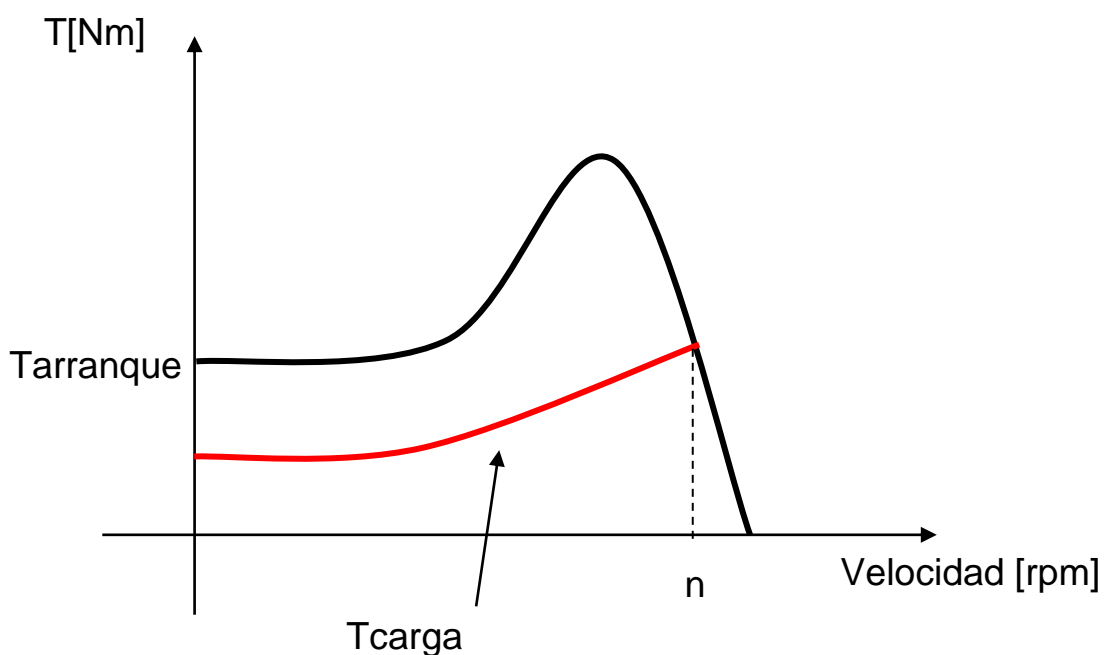




Como vemos en la gráfica para velocidades bajas la corriente es mucho más grande que para velocidades altas. Entonces en el momento del arranque el torque de carga es mayor que el torque de arranque del motor, por lo tanto, el motor no puede acelerarse y la velocidad permanece igual a cero. Sin embargo, si hay circulación de corriente y a un valor muy elevado. El motor está preparado para soportar esos niveles de corrientes solo durante unos segundos, el tiempo que dura el arranque, si se prolonga este tiempo el calor disipado por efecto joule quema el motor.

Carga variable con la velocidad

Este tipo de cargas están relacionadas con el movimiento de fluidos como el aire o los líquidos. Son ejemplos los ventiladores, las bombas centrífugas, las hélices de un avión. La curva de carga tiene la siguiente forma:



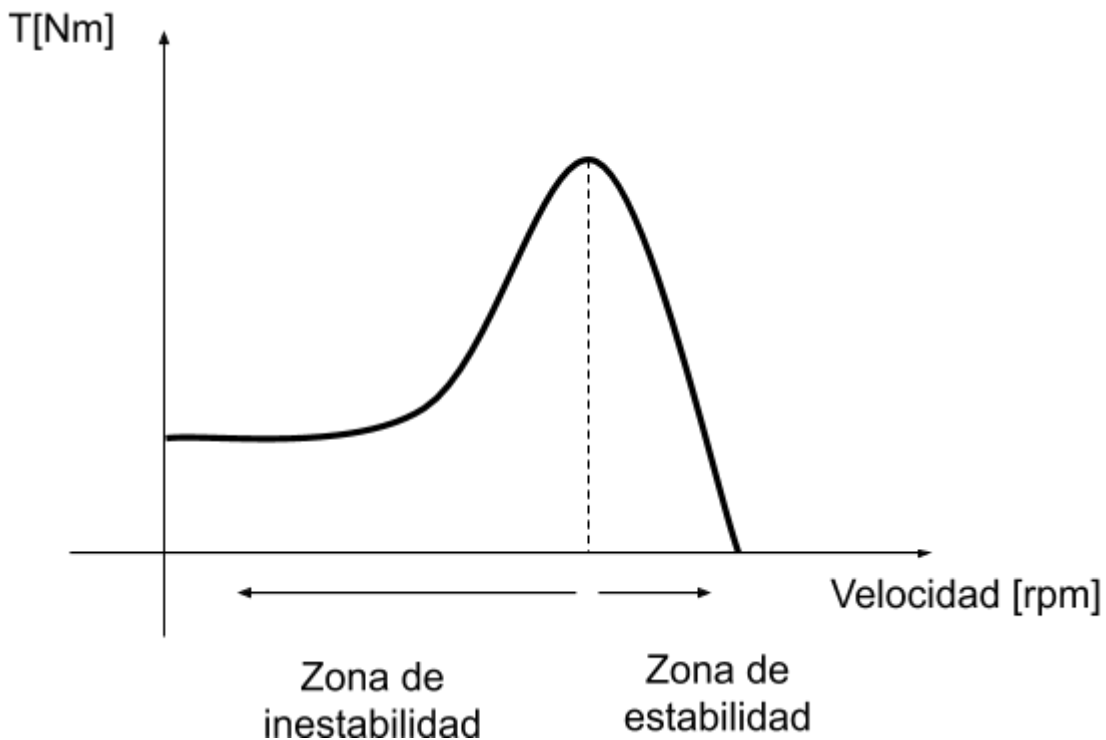
En este caso el torque de carga aumenta a medida que aumenta la velocidad, ya que cuanto mayor es la velocidad mayor es la fricción contra el fluido (la carga).

Motores asincrónicos o de inducción

Accionamientos Electromecánicos

Zonas de estabilidad e inestabilidad

Existen dos zonas en la curva torque vs velocidad: Una estable en la que el motor puede operar correctamente y otra inestable en la que el motor no puede operar.

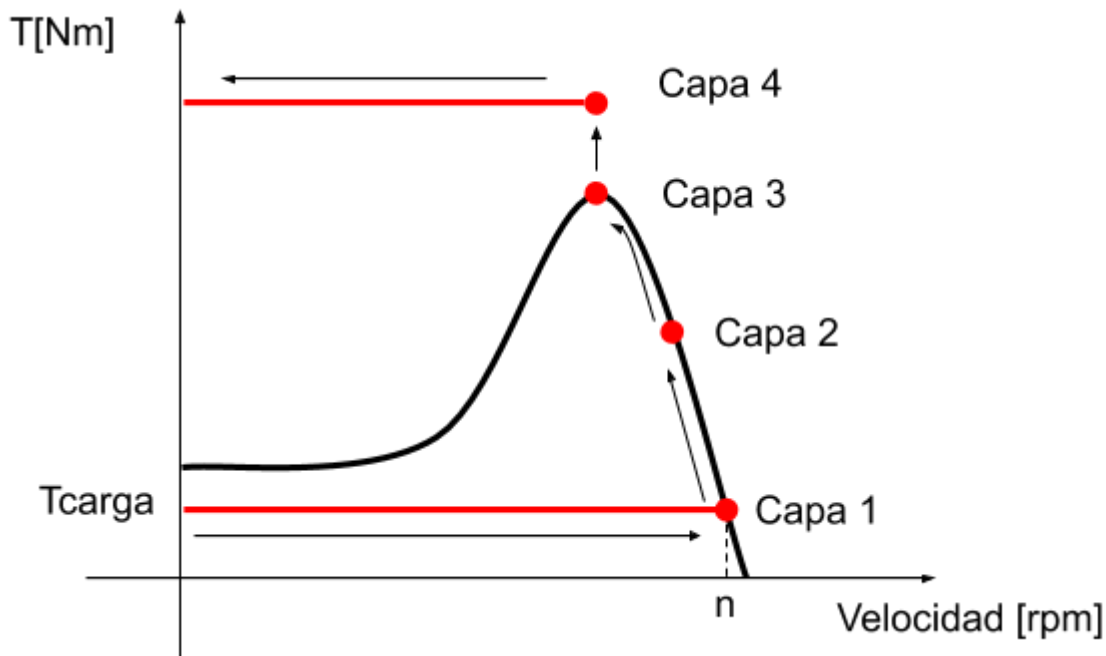


Para entender esto imaginemos la siguiente situación: tenemos una sierra eléctrica que está cortando un bloque piedra que está compuesto por 4 tipos distintos de piedras. Cuanto más profundo, más dura es la piedra. Esto implica que cuando la sierra vaya entrando en las distintas capas de la piedra va a tener que aumentar la “fuerza con la que corta”, en otras palabras, el motor que acciona la sierra va a tener que aumentar el torque mecánico.





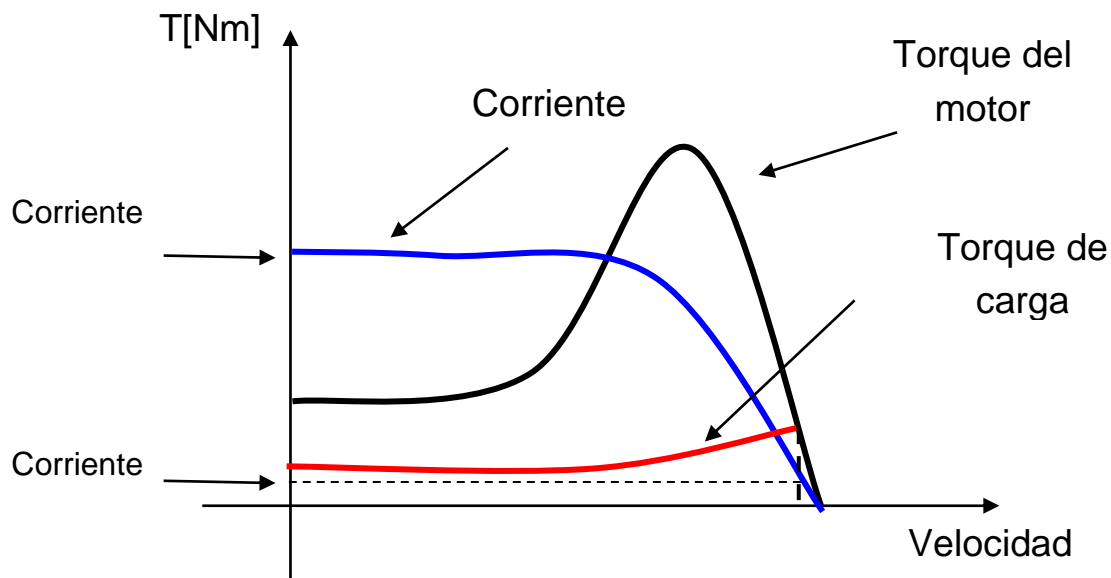
Veamos la curva torque vs velocidad del motor que acciona la sierra:



Inicialmente el motor está detenido, la sierra se coloca sobre la capa 1 y el motor se enciende. Como vemos en la gráfica el torque de carga es menor a torque del motor, por lo tanto, el motor logra acelerarse hasta estabilizarse en el punto de operación (Capa 1). En este punto el torque del motor es igual al torque de carga, por lo que se establece una velocidad constante de operación. Luego la sierra llega a la Capa 2, como esta es más dura (lo que implica que el torque de carga es mayor) la velocidad del motor disminuye, pero, como vemos en la curva, el torque del motor aumenta, de esta forma se estabiliza en el nuevo punto de operación Capa 2. Nuevamente el torque del motor iguala al de la carga. Lo mismo ocurre al llegar a la Capa 3, en este momento se alcanza el torque máximo del motor. Al pasar a la Capa 4 la velocidad se va a reducir, ya que la capa es más dura, pero en este caso el torque del motor no va a aumentar, sino que va a disminuir. Cuando pase esto el torque de carga va a ser mayor al torque del motor y la velocidad va a ser cada vez menor y el motor se va a detener. Esto se debe a que se llegó a la **zona de inestabilidad del motor**.

Arranque

El arranque de un motor de inducción es un momento particular ya que la corriente puede alcanzar valores de hasta 7 veces la corriente nominal. En la siguiente figura vemos la corriente en función de la velocidad del motor:



Estos elevados valores de corriente de arranque, sumados a tiempos prolongados de arranque, pueden quemar el motor (ya que se aumenta mucho la temperatura por efecto joule). A continuación, veremos distintas formas de arrancar un motor de inducción

Arranque directo

Para motores pequeños (menores a 5kW de potencia), suele no ser necesario ningún tipo de arranque especial, sino que el motor puede ser arrancado conectándolo directamente a la red.

Al principio el motor consumirá una corriente más alta durante algunos segundos, irá aumentando su velocidad y disminuyendo la corriente que consume de forma progresiva, hasta establecerse en su punto de operación.

Este tipo de arranque es brusco y violento.

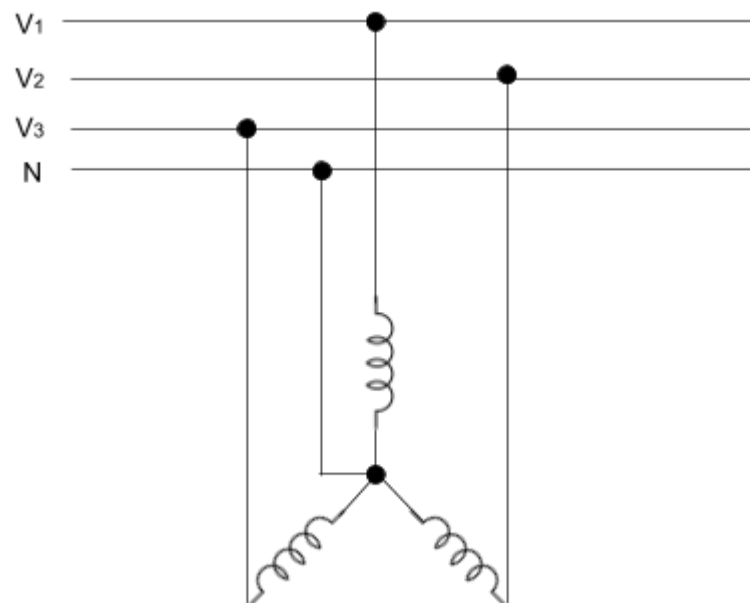
Arranque Estrella-triángulo

Para motores de mayor potencia, las corrientes de arranque y los tiempos de arranque son mayores. Esto hace que aumente mucho la temperatura por efecto joule y por lo tanto se debe aplicar un arranque especial con el objetivo de reducir las corrientes de arranque.

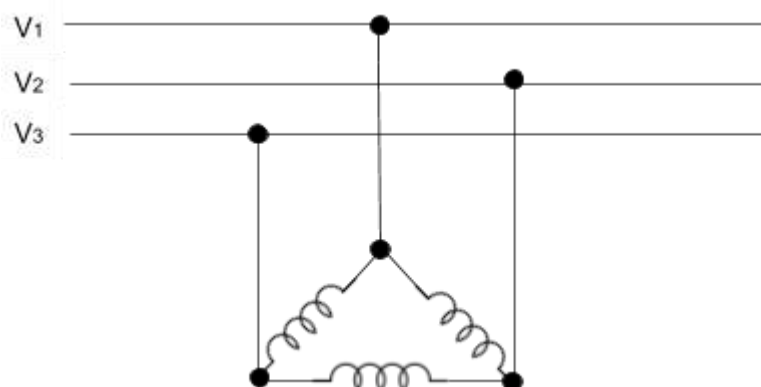


El arranque Estrella-triángulo consiste en arrancar el motor conectado en estrella y pasados unos segundos, conectarlo (automáticamente) en triángulo. Lo que estamos conectando en estrella o triángulo es el bobinado trifásico del estator.

¿Qué se logra con esto? Supongamos que tenemos un sistema trifásico 220/380V. Al conectar el motor en estrella tenemos lo siguiente:



Cada una de las bobinas del estator está sometida a la tensión de fase (220V). Si se conecta en triángulo:



Cada una de las bobinas está sometida a la tensión de línea (380V).

Entonces, al principio del arranque se conecta el motor en estrella y la tensión aplicada es menor, por lo tanto, la corriente también es menor. A su vez, el torque del motor

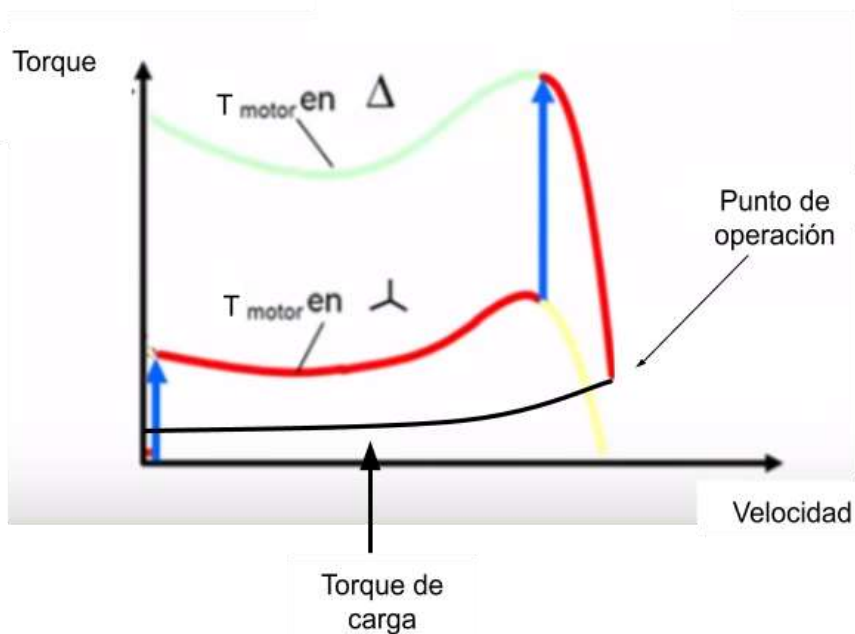
Motores asincrónicos o de inducción

Accionamientos Electromecánicos

también será menor. Es por esto que cuando el motor ya ganó velocidad, se lo conecta en triángulo donde la tensión es mayor junto con el torque.

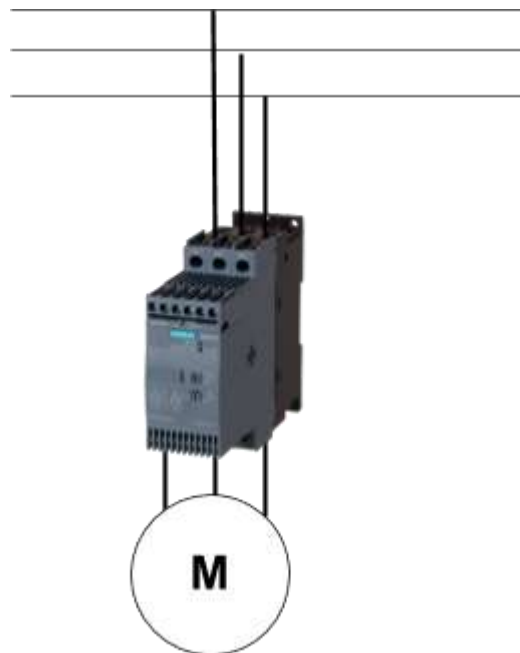
Este tipo de arranque es menos brusco que el arranque directo.

En la siguiente gráfica se observa cómo se modifica la curva torque vs velocidad:

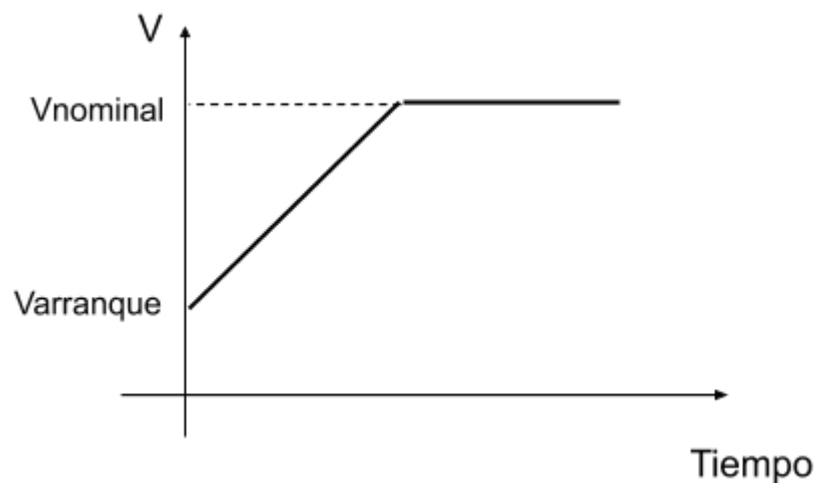


Arranque suave

El arranque suave es un **dispositivo electrónico** que permite controlar la tensión con la que se alimenta el motor. Cómo logra controlar la tensión escapa a los alcances de esta materia. En la siguiente gráfica vemos un esquema de la conexión de un arrancador suave:

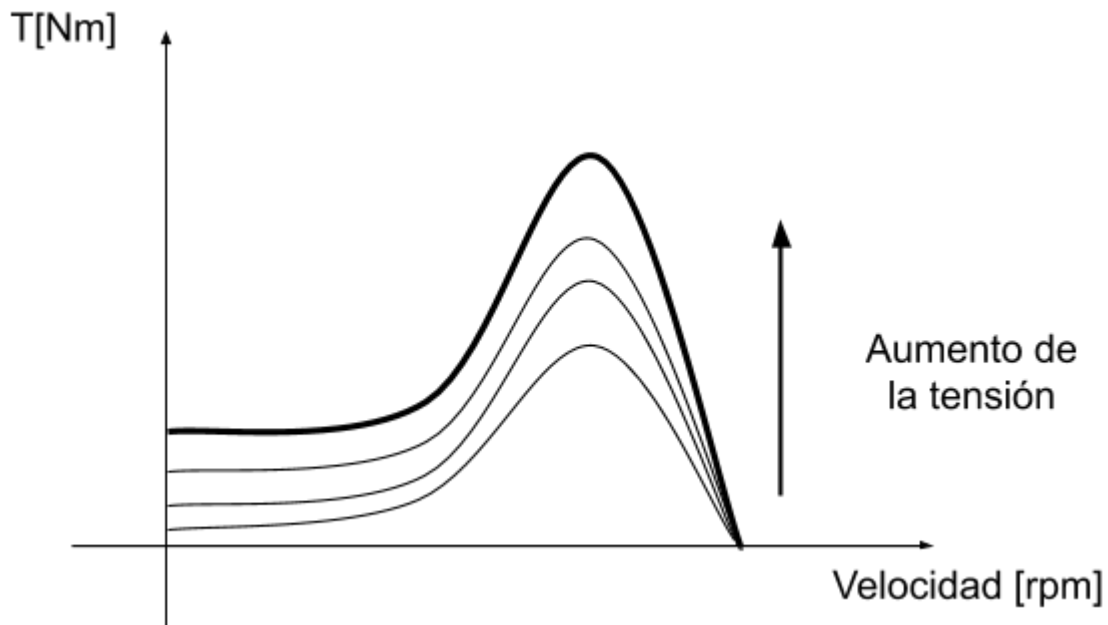


El arranque suave aumenta de forma progresiva la tensión aplicada al motor como se observa en la siguiente gráfica:



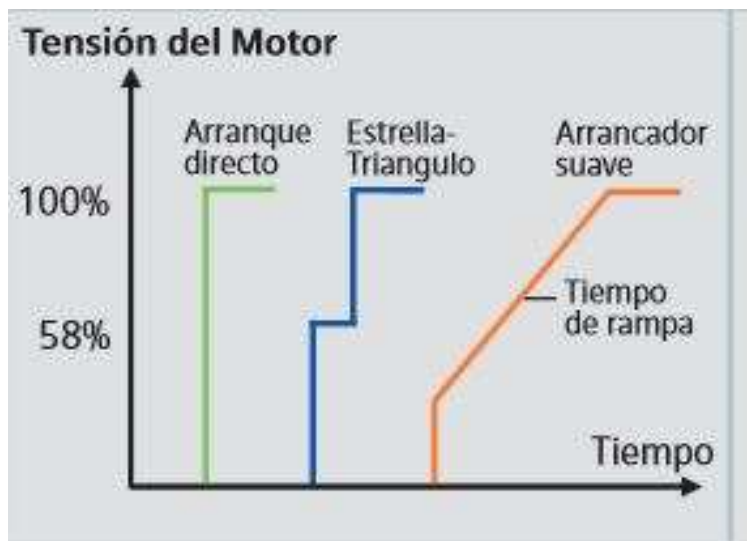
Con esto se logra que al inicio del arranque la tensión sea menor y por ende la corriente y el torque también sean menores. A medida que aumenta la velocidad, se aumenta progresivamente la tensión y por ende el torque. De esta forma se evitan elevados valores de corriente en el arranque y se lleva adelante un arranque suave. Como contraparte, este método es más costoso que los anteriores.

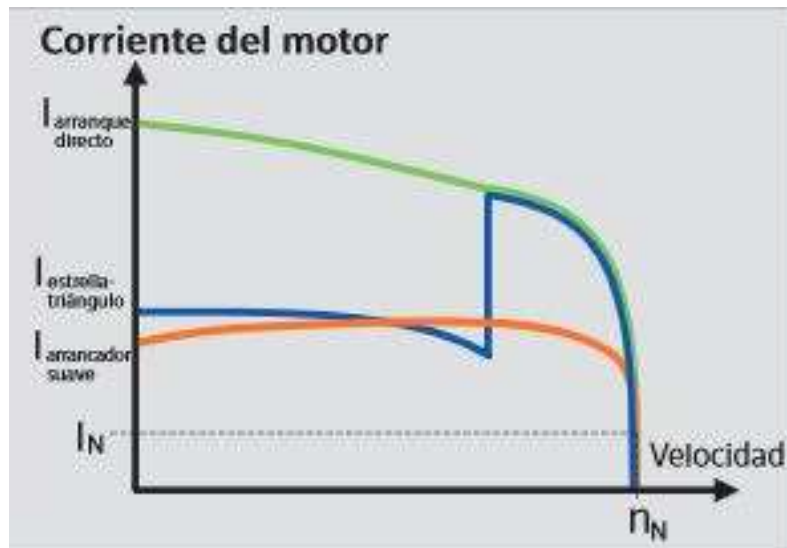
En la siguiente gráfica podemos ver cómo se modifica el torque a medida que aumenta la tensión aplicada al motor:



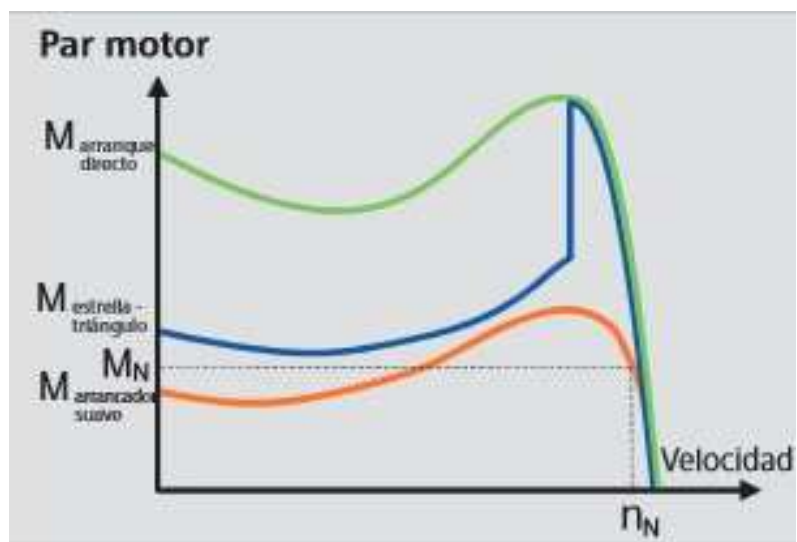
Comparación

Las siguientes gráficas comparan la tensión, la corriente y el torque de los tres tipos de arranque





En esta última gráfica se comparan los torques de los 3 tipos de arranque. Otra forma común de llamar al “torque” es “par” y se lo suele simbolizar con la letra “M”



Motores asincrónicos o de inducción

Accionamientos Electromecánicos

Regulación de la velocidad (Variador de frecuencia)

Hace algunas décadas variar la velocidad de un motor de inducción era complicado e ineficaz. En este apunte no veremos los métodos que se utilizaban. Con el surgimiento de la **electrónica de potencia** se inventaron soluciones efectivas para variar la velocidad de los motores asincrónicos.

En el apartado anterior nombramos un dispositivo de la electrónica de potencia: el **arranque suave**. En este apartado nos centraremos en el **variador de frecuencia (VFD en inglés)**.

Cómo se explicó al principio del apunte, la **velocidad sincrónica** de un motor de inducción depende de la frecuencia de alimentación del sistema trifásico:

$$n_1 = f_1 \times 60 \text{ rpm (revoluciones por minuto)}$$

La frecuencia de la red eléctrica es 50 Hz. La velocidad del rotor, o sea, a la que gira el motor, es menor que la sincrónica pero cercana. Por lo tanto, variando la frecuencia de la tensión con la que alimentamos el motor es posible controlar su velocidad de giro.

En este curso no veremos cómo es que el variador de velocidad logra modificar la frecuencia de alimentación.

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



El variador de velocidad, además de poder variar la velocidad del motor, también puede ser utilizado para realizar un arranque suave. Sin embargo, posee un costo elevado.



Aplicaciones del motor de inducción

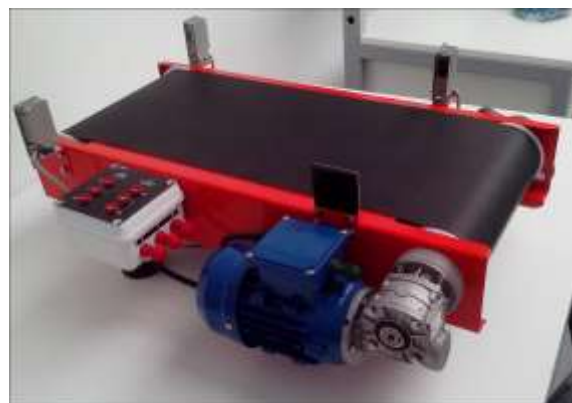
El motor de inducción es el más utilizado a lo largo de la industria y sus aplicaciones son varias:

- Máquinas herramienta
- Grúas, elevadores y vehículos
- Bombas, ventiladores y compresores
- Prensas, máquinas de curvado y laminadores

Grúa



Cinta transportadora



Extractor



Ascensor



Motores asincrónicos o de inducción

Accionamientos Electromecánicos

Ventilador



Bomba de agua





Bibliografía

Libros

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

Chapman S. J., *Máquinas Eléctricas*

Sitios WEB

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