Javier Pereda
Profesor
Departamento de Ingeniería Eléctrica
Pontificia Universidad Católica de Chile



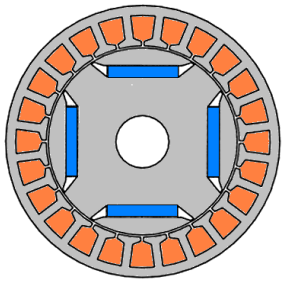
IEE 2213
Máquinas Eléctricas

6. Máquina Síncrona

Características y clasificación; circuito equivalente y diagrama fasorial; Potencia activa, reactiva y torque; Operación red aislada y barra ∞; regulación de voltaje; diagrama de potencia PQ; diagrama de operación; curva v; pruebas en c.a y c.c.; prueba de deslizamiento

V.09.10.19

Máquina Síncrona
Características y Aplicaciones



- Máquina eléctrica que gira a la misma frecuencia del CMR, es decir, **gira en sincronía** con la frecuencia de la corriente de alimentación (motor) o la generada (generador):

$$\omega_s = \omega_m = \omega/p \qquad \omega_r = 0$$

- Generalmente el rotor se alimenta con **bobinas DC** ó **imanes** y el estator con corrientes polifásicas. Sin embargo también se puede construir de forma inversa.
- La máquina síncrona es la **más utilizada para generación** de energía, por lo tanto siempre se tiende a hablar desde esa perspectiva.
- Se utiliza en la generación convencional como la **hidráulica y térmica** (50 o 60Hz), y también en energías variables como la **eólica y mareomotriz**, y en generadores **aeroespaciales** donde se utilizan frecuencias altas (e.g. 400Hz) para reducir el tamaño.
- También se utilizan como motores en **procesos industriales** donde se requiere una velocidad constante o muy controlada (e.g. papelera), un alto torque y potencia (e.g. Molino SAG) y una alta eficiencia (**tracción eléctrica**).
- Una gran ventaja sobre su competidor (motor asíncrono) es que **puede regular el FP** operando en la unidad o incluso entregando reactivos a la red cuando opera con FP capacitivo (condensador síncrono).

Máquina Síncrona

Principios del funcionamiento

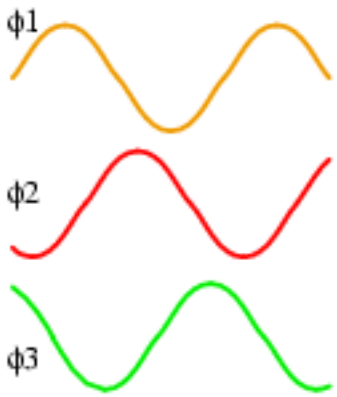
El estator se alimenta con AC trifásica para generar un CMR: $\omega_s = \omega/p$

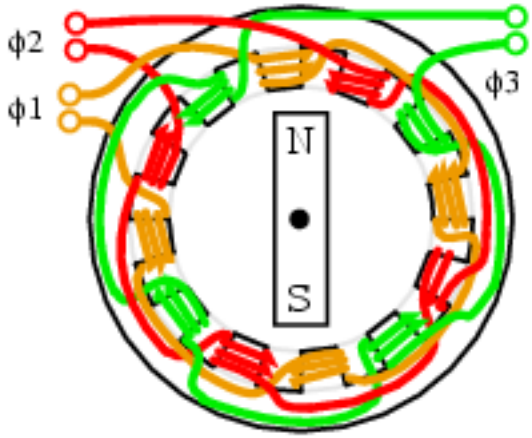
El rotor se alimenta con DC o imanes permanentes: $\omega_r = 0$

Por lo tanto, para que exista torque medio se debe cumplir:

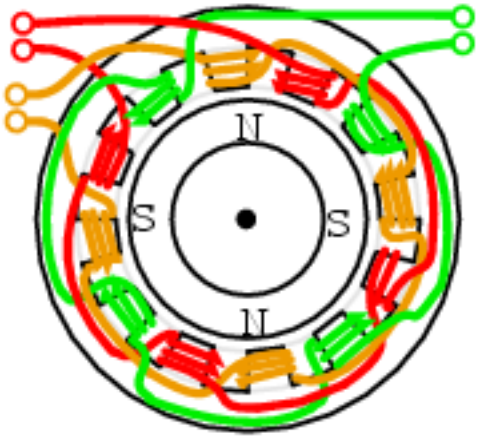
$$\omega_s = \omega_m + \omega_r \quad \Rightarrow \quad \omega_s = \omega_m$$

La velocidad del rotor debe ser la misma que la del CMR (giro sincronizado)





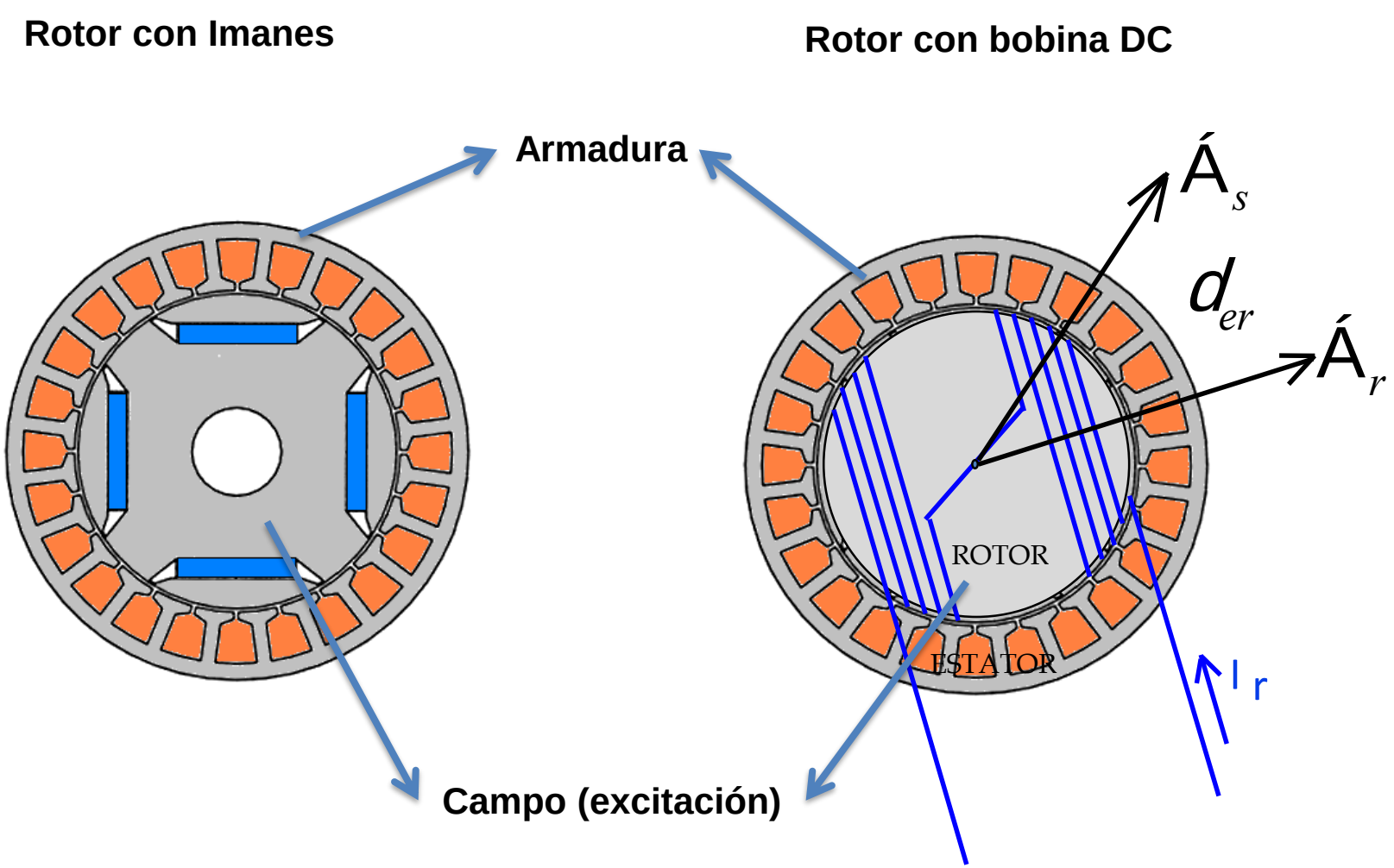
Rotor con polos salientes



Rotor cilíndrico

Máquina Síncrona

Principios del funcionamiento



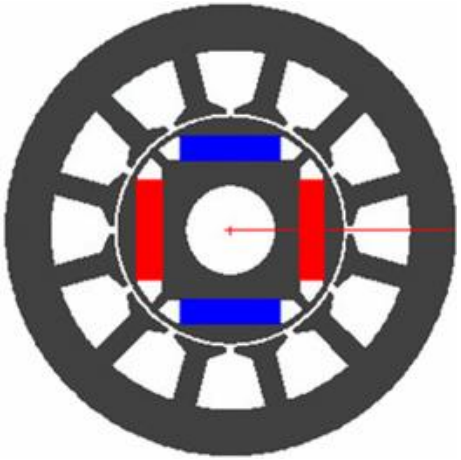
Máquina Síncrona

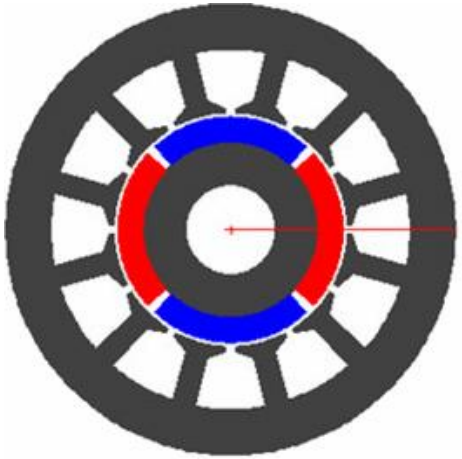
Clasificación

Polos salientes

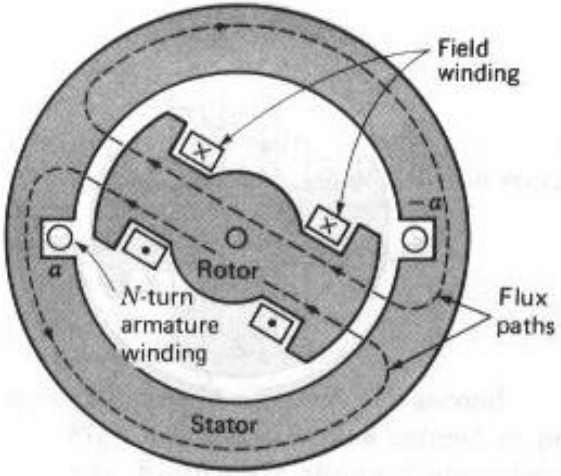
Rotor cilíndrico

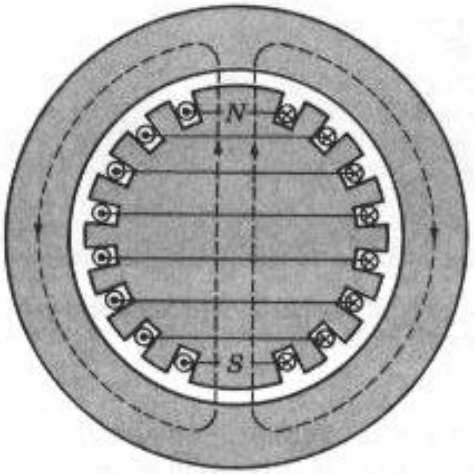
Imanes Permanentes





Bobinas con corriente DC





Máquina Síncrona

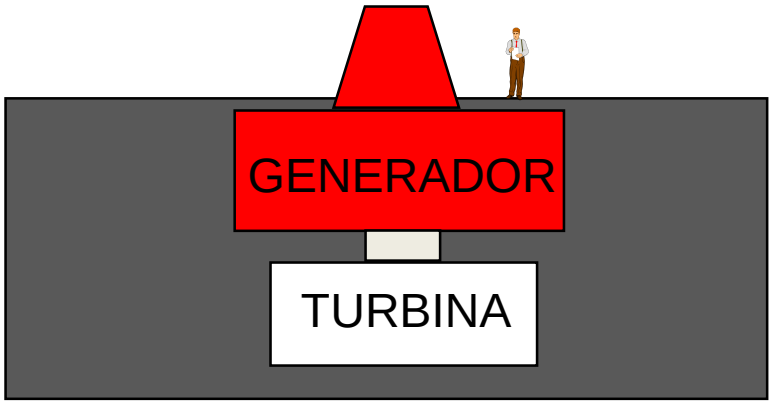
Clasificación

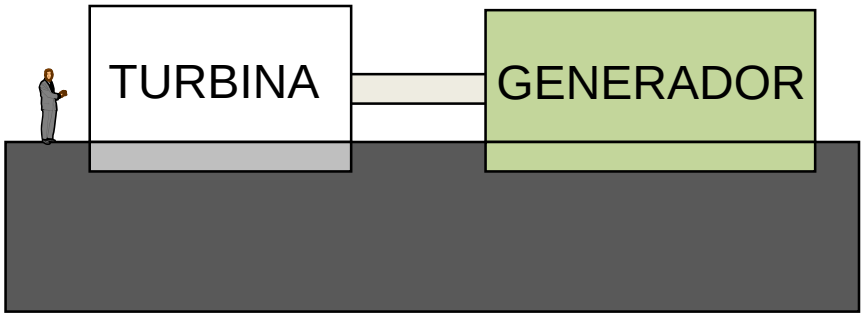
Polos salientes

$X_d > X_q$ (usual sin imanes)
Muchos polos
Bajas rpm
Rotor corto
Rotor gran diámetro
Eje vertical (en general)
Centrales hidráulicas

Rotor cilíndrico

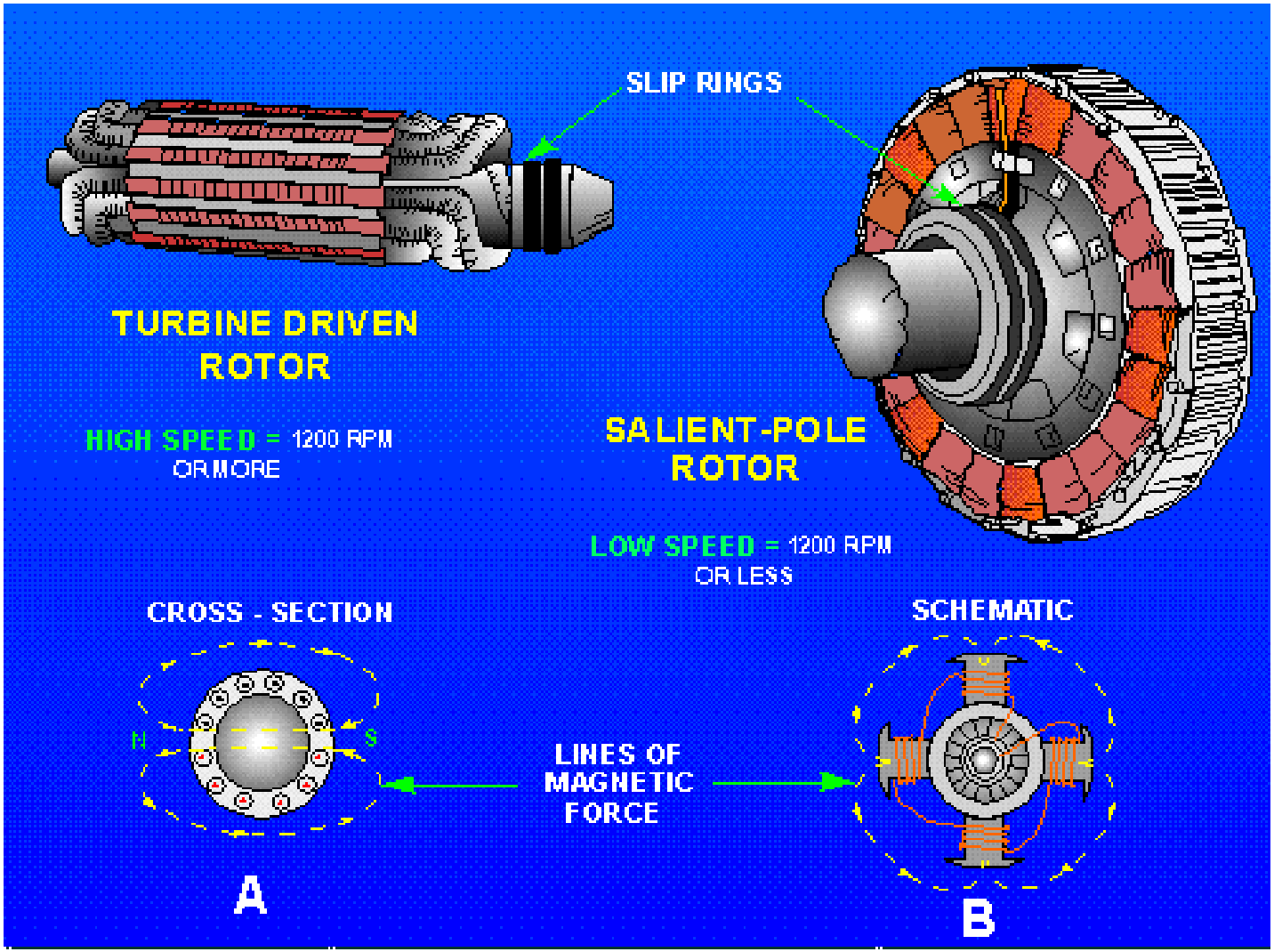
$X_d = X_q = X_s$
1 par de polos (máx. 2)
3.000 rpm (50 Hz)
Rotor largo
Rotor poco diámetro
Eje horizontal (en general)
Centrales térmicas





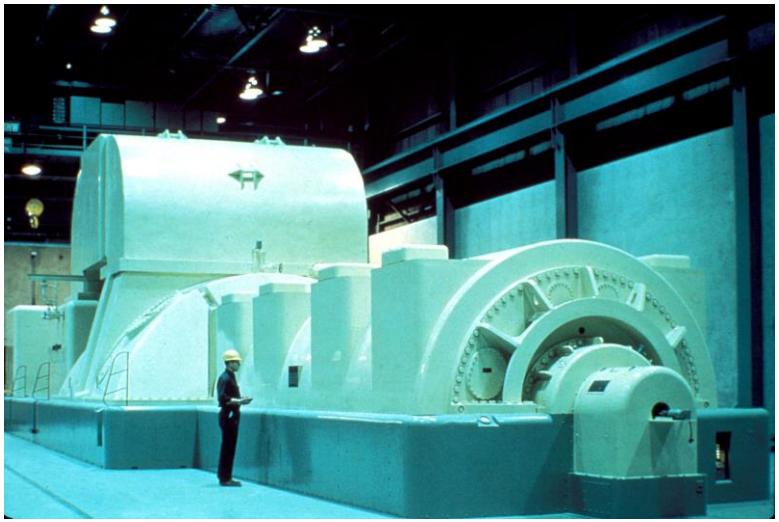
Máquina Síncrona

Clasificación



Máquina Síncrona

Clasificación



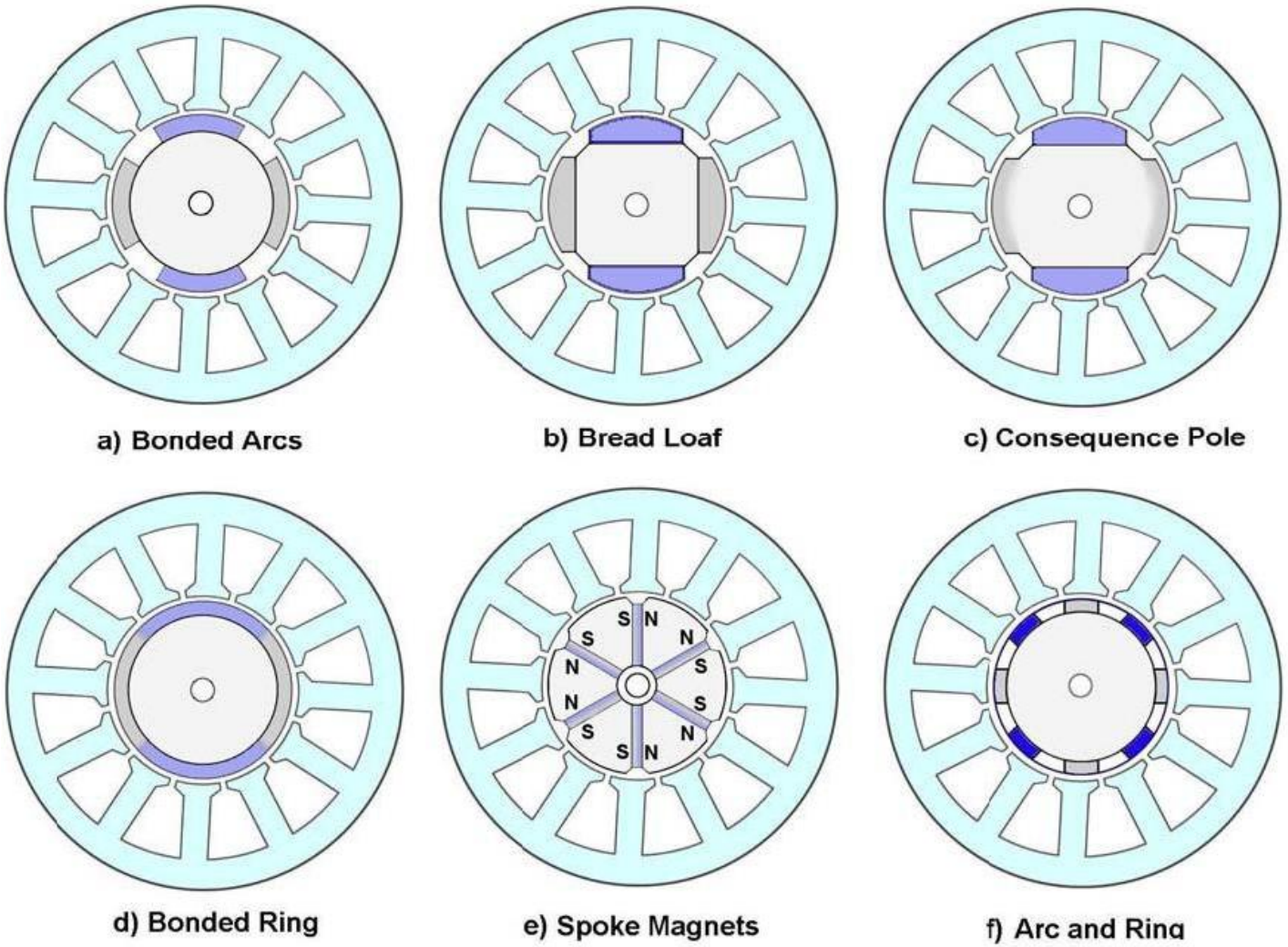






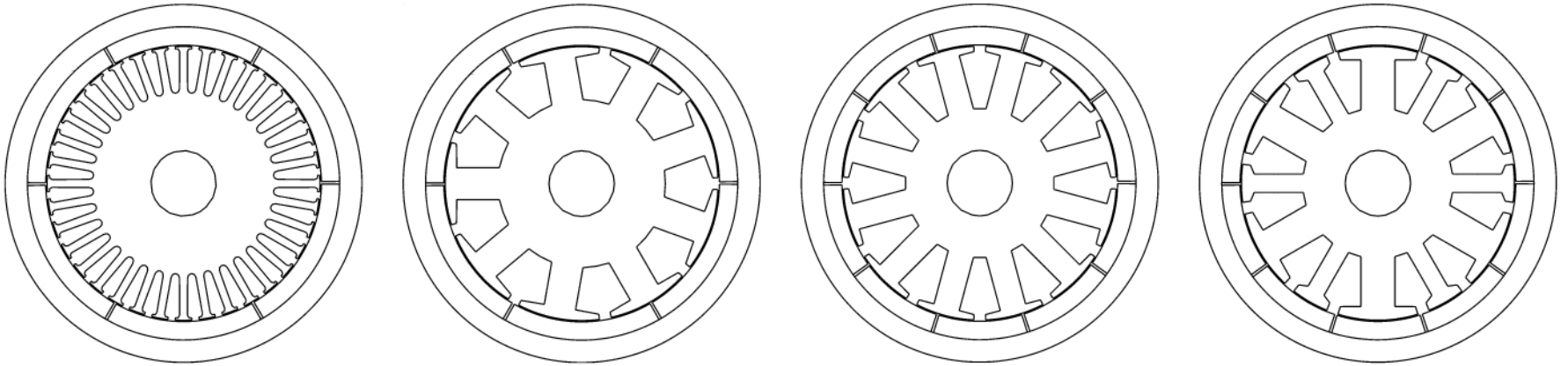
Máquina Síncrona

Ejemplo de algunas configuraciones



Máquina Síncrona (caso específico)

Corrientes polifásicas en el rotor (3 anillos)

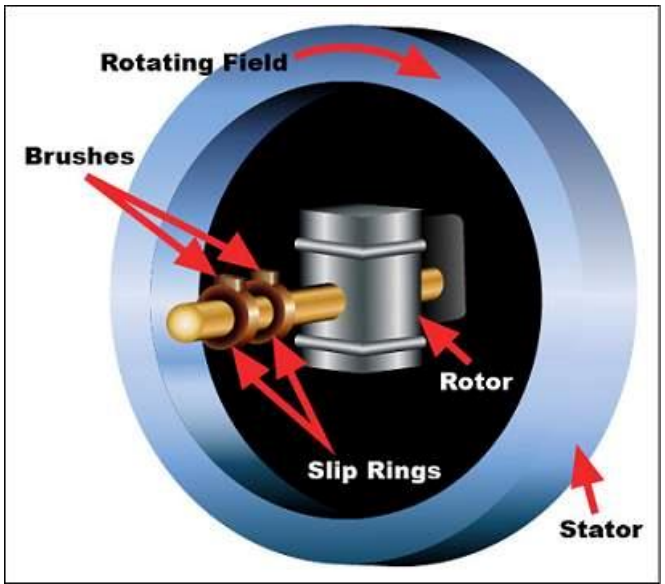


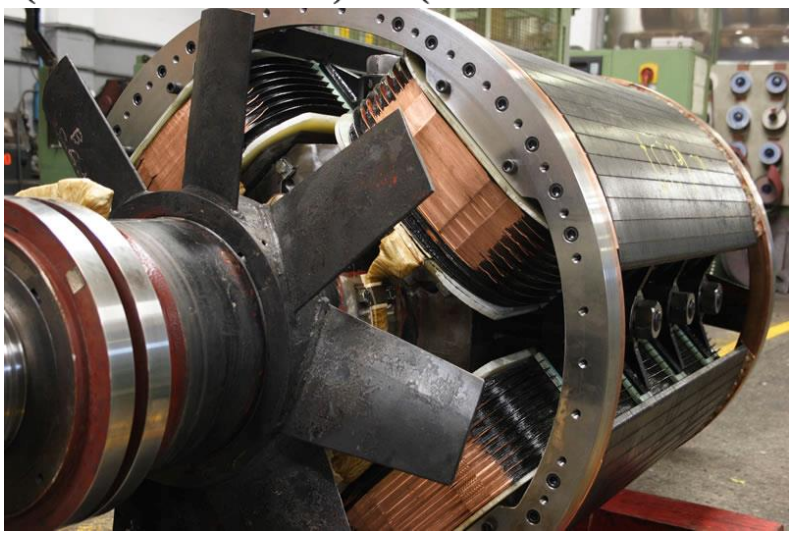
(a)
36-slot/6-pole

(b)
9-slot/6-pole

(c)
12–slot/10-pole
(all teeth wound)

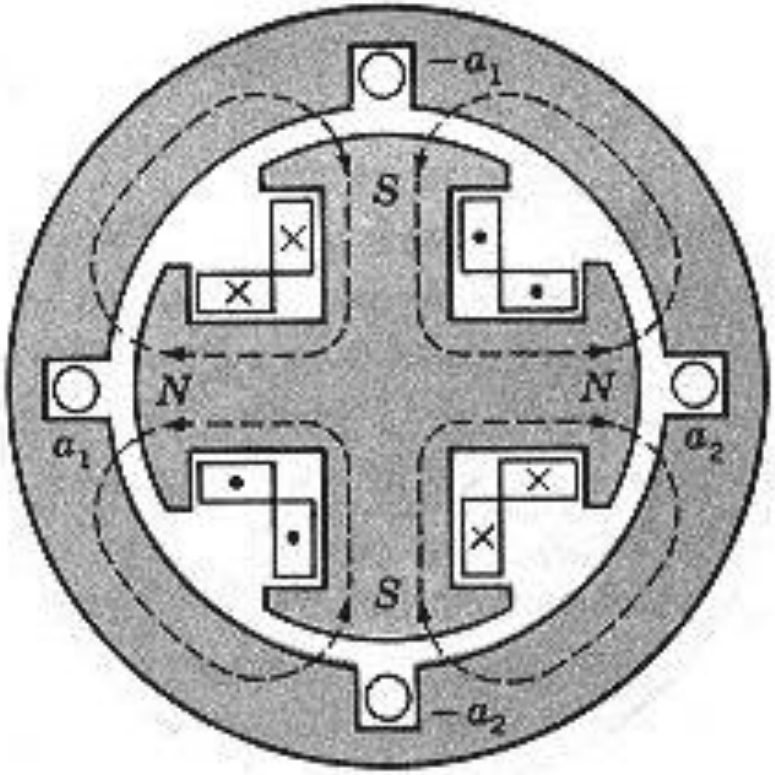
(d)
12-pole/10-pole
(alternate teeth wound)

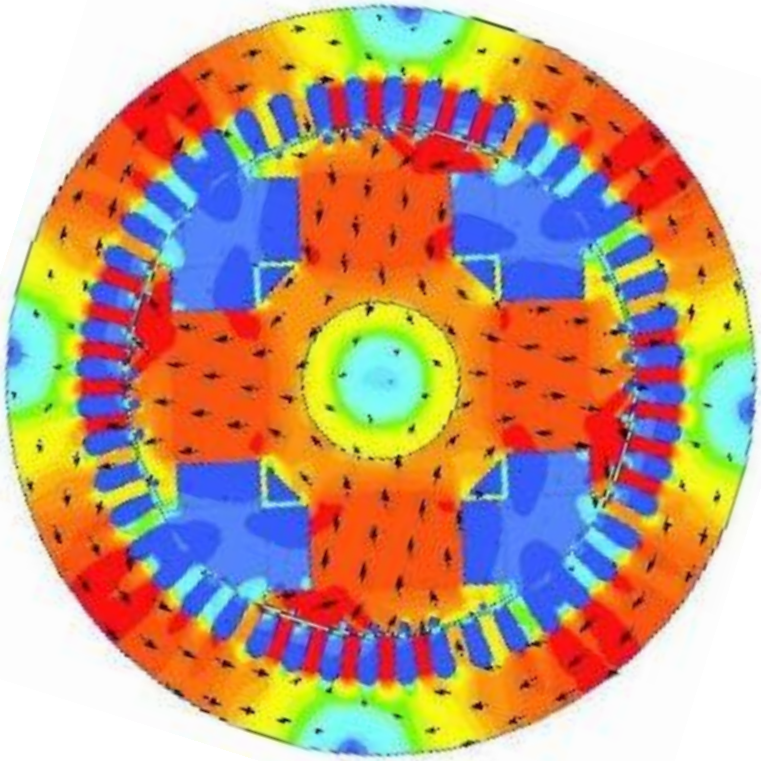




Máquina Síncrona

Flujo magnético

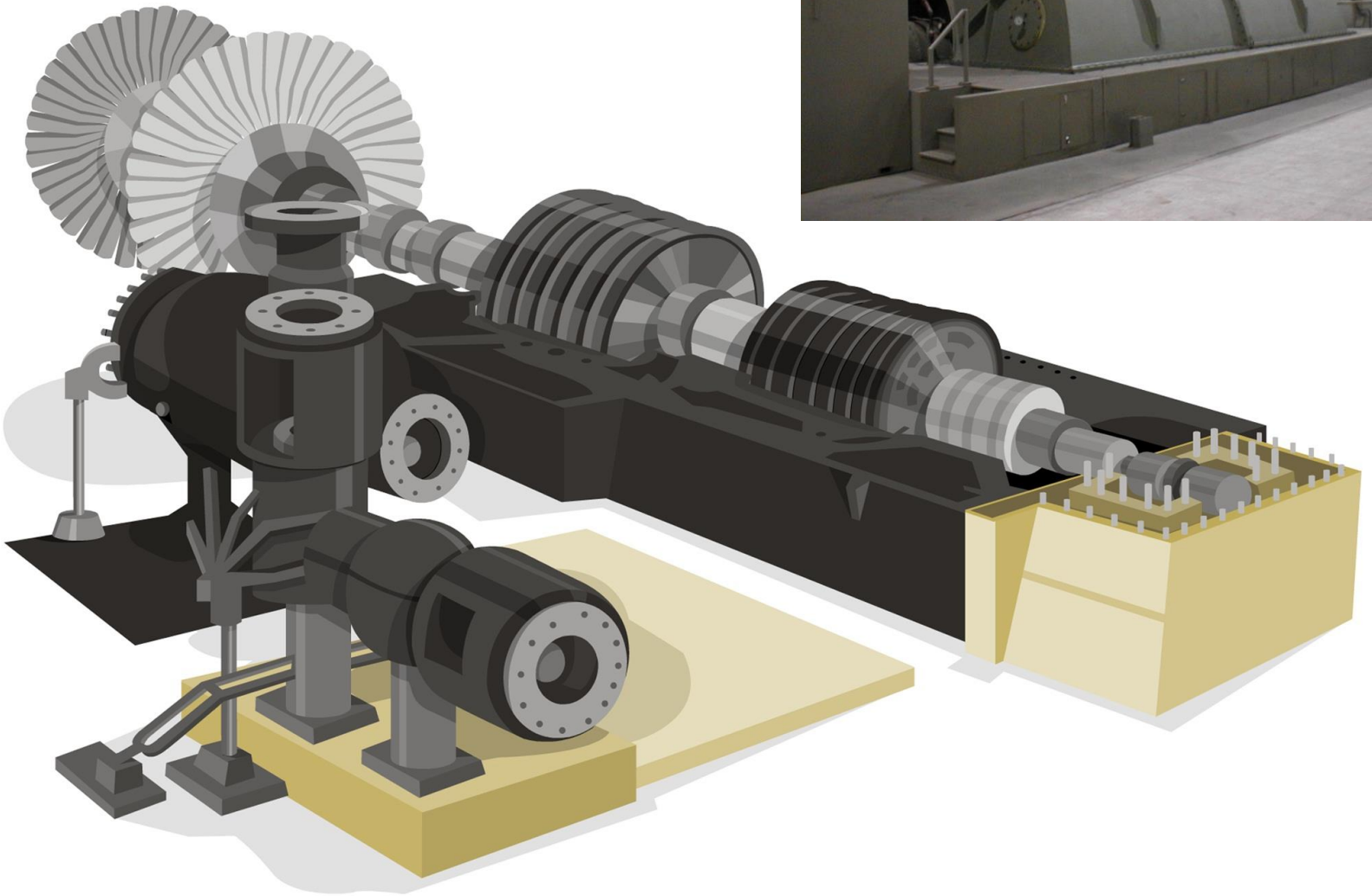




Máquina Síncrona

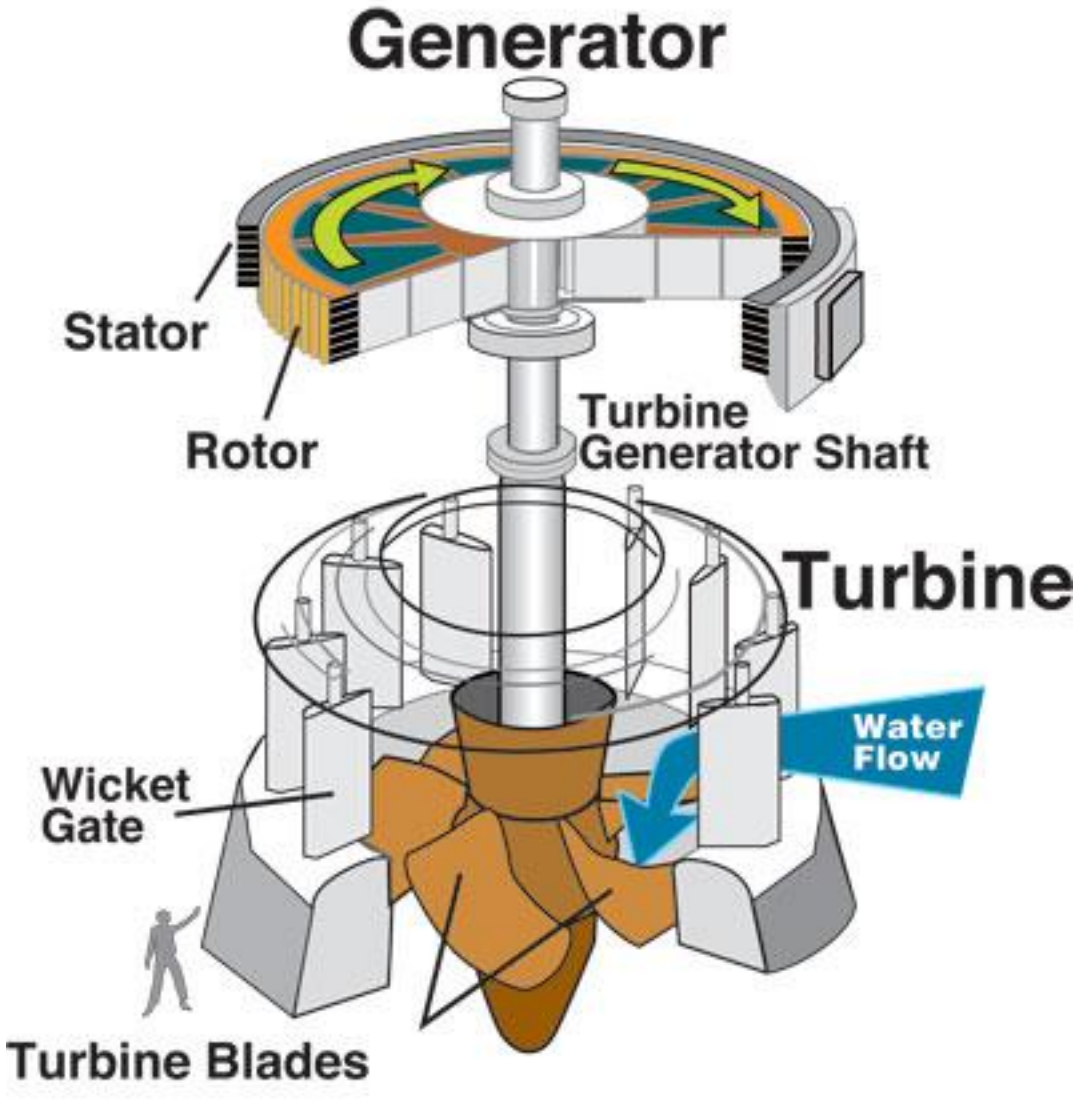
Central Térmica





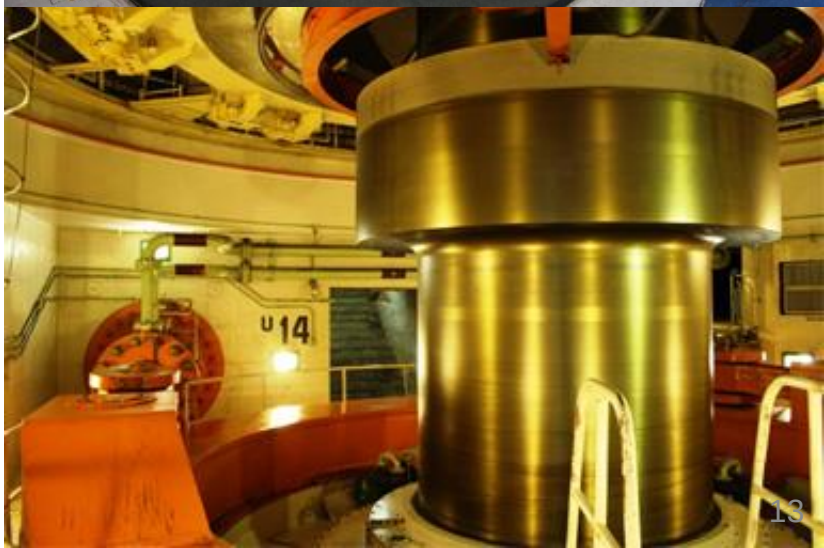
Máquina Síncrona

Central Hidráulica









Máquina Síncrona

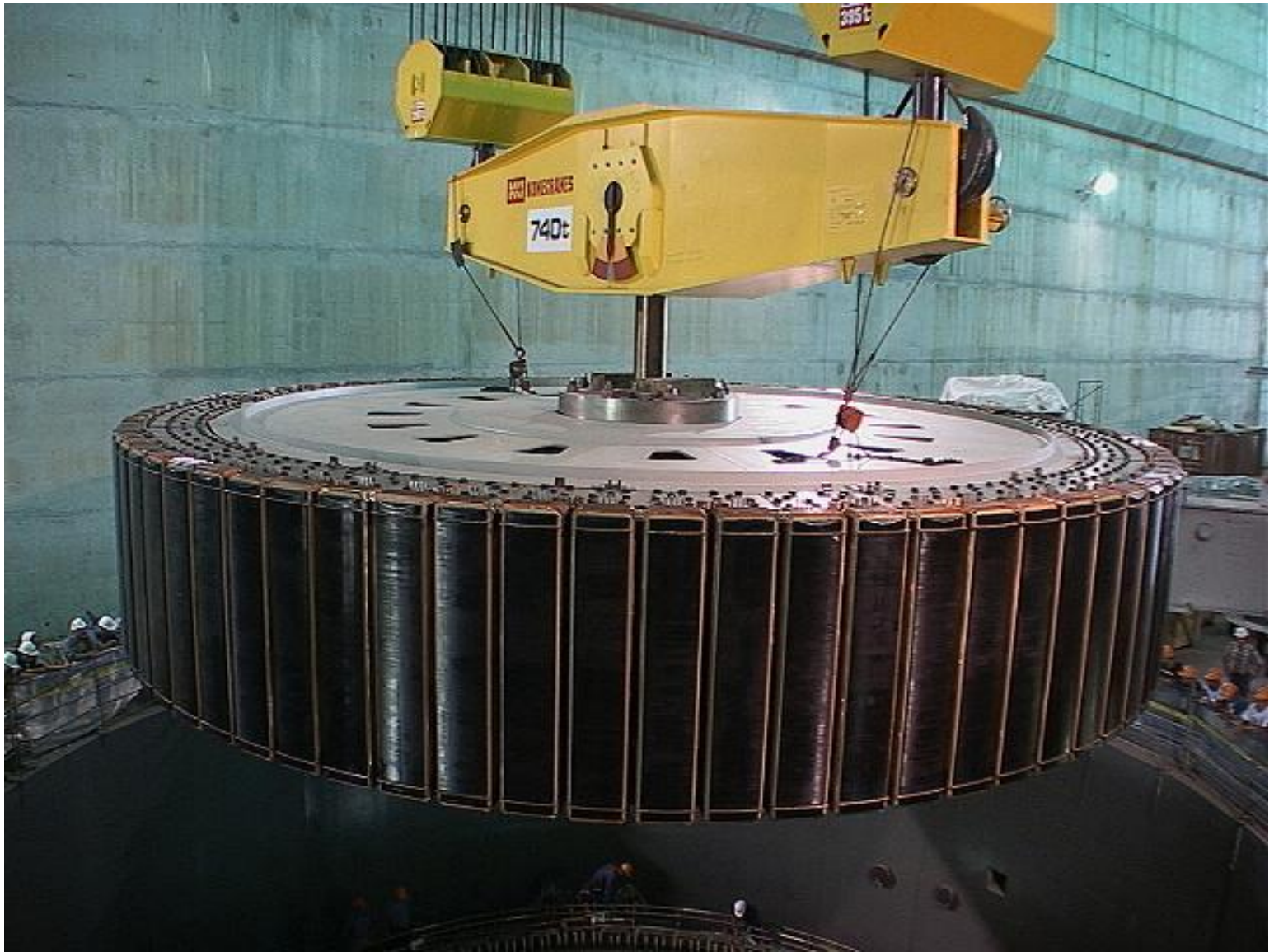
Central Hidráulica





Máquina Síncrona

Central Hidráulica



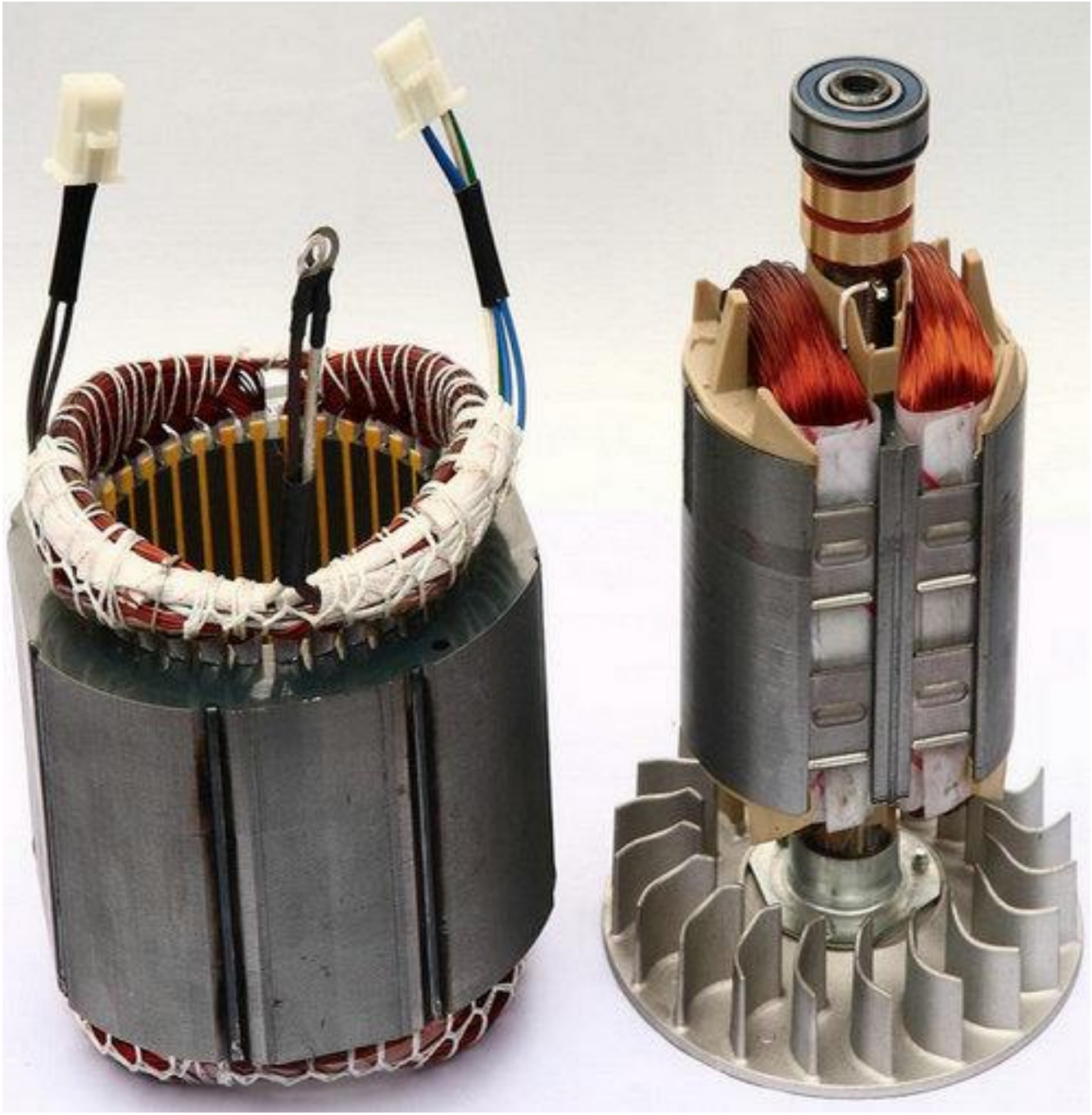
Máquina Síncrona

Central Hidráulica



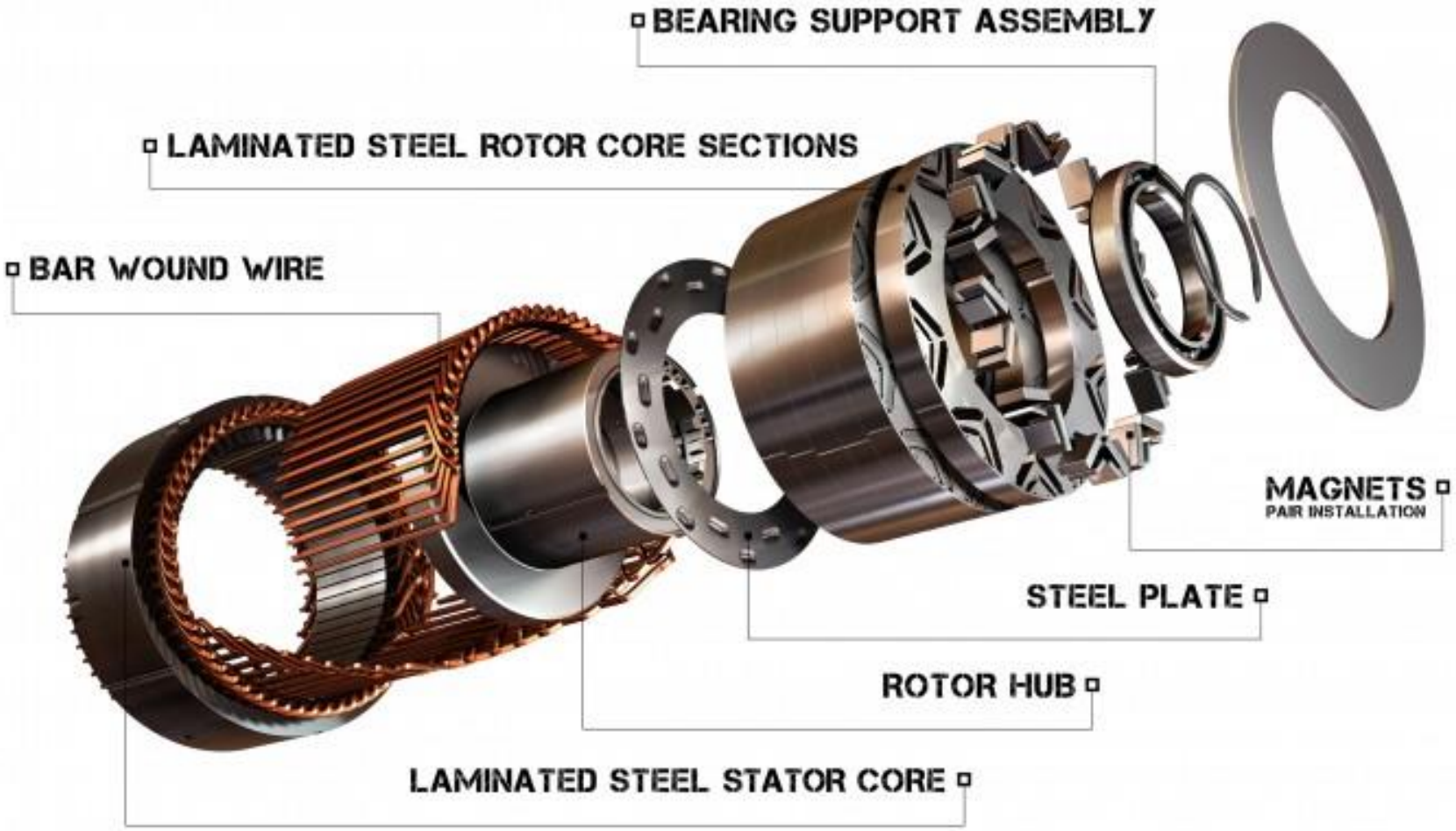


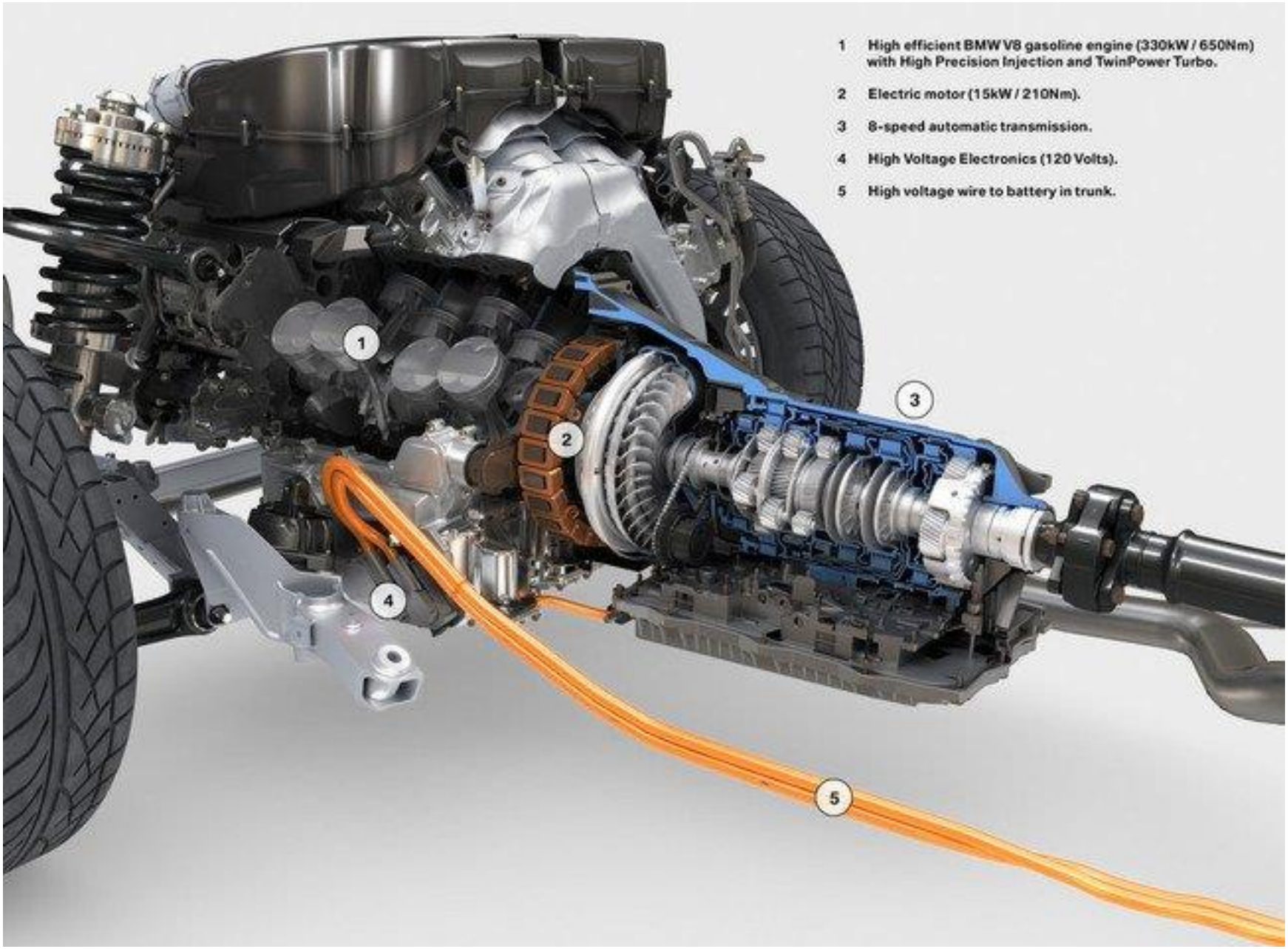


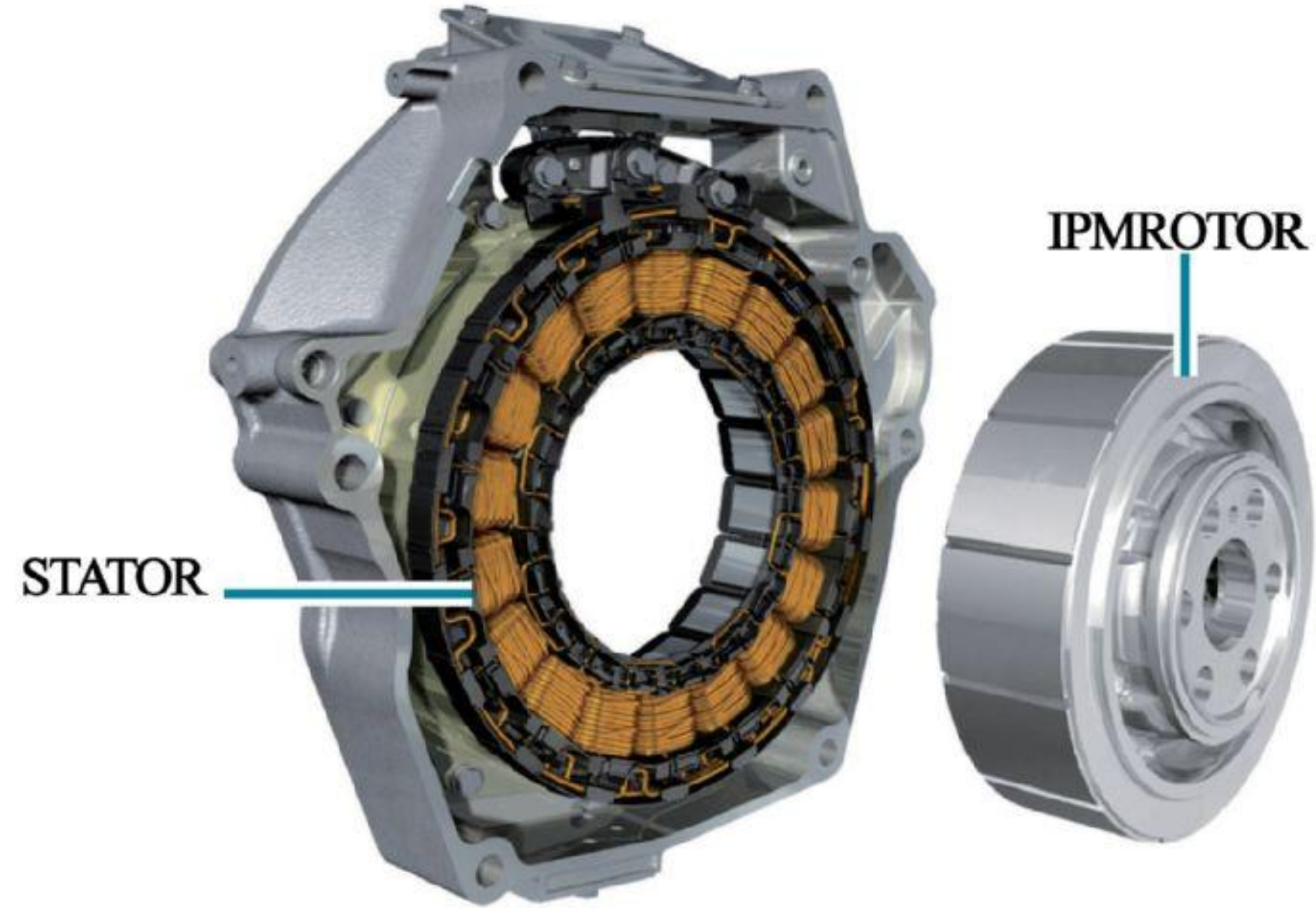




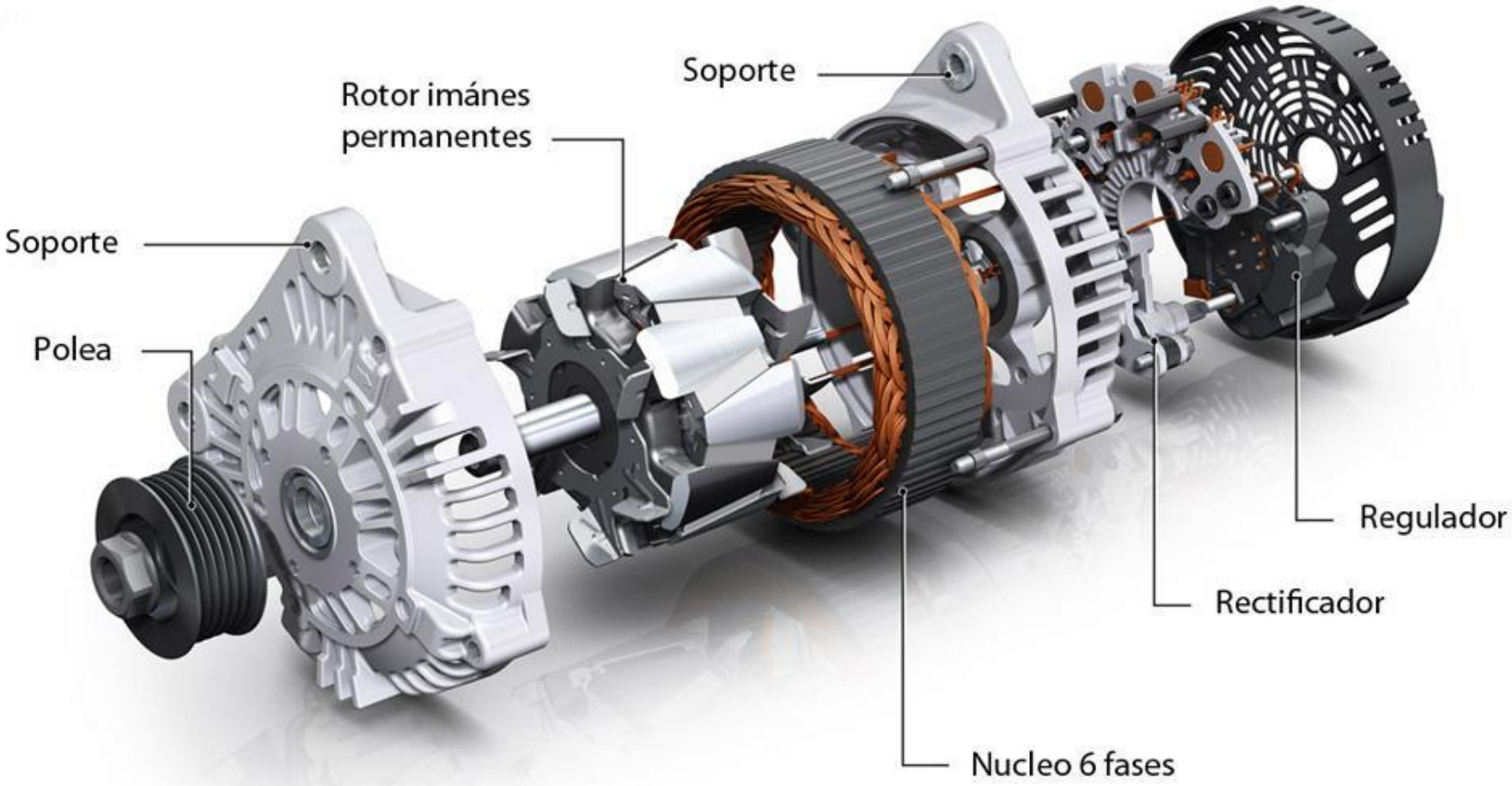
General Motors
Permanent Magnet Electric Motor

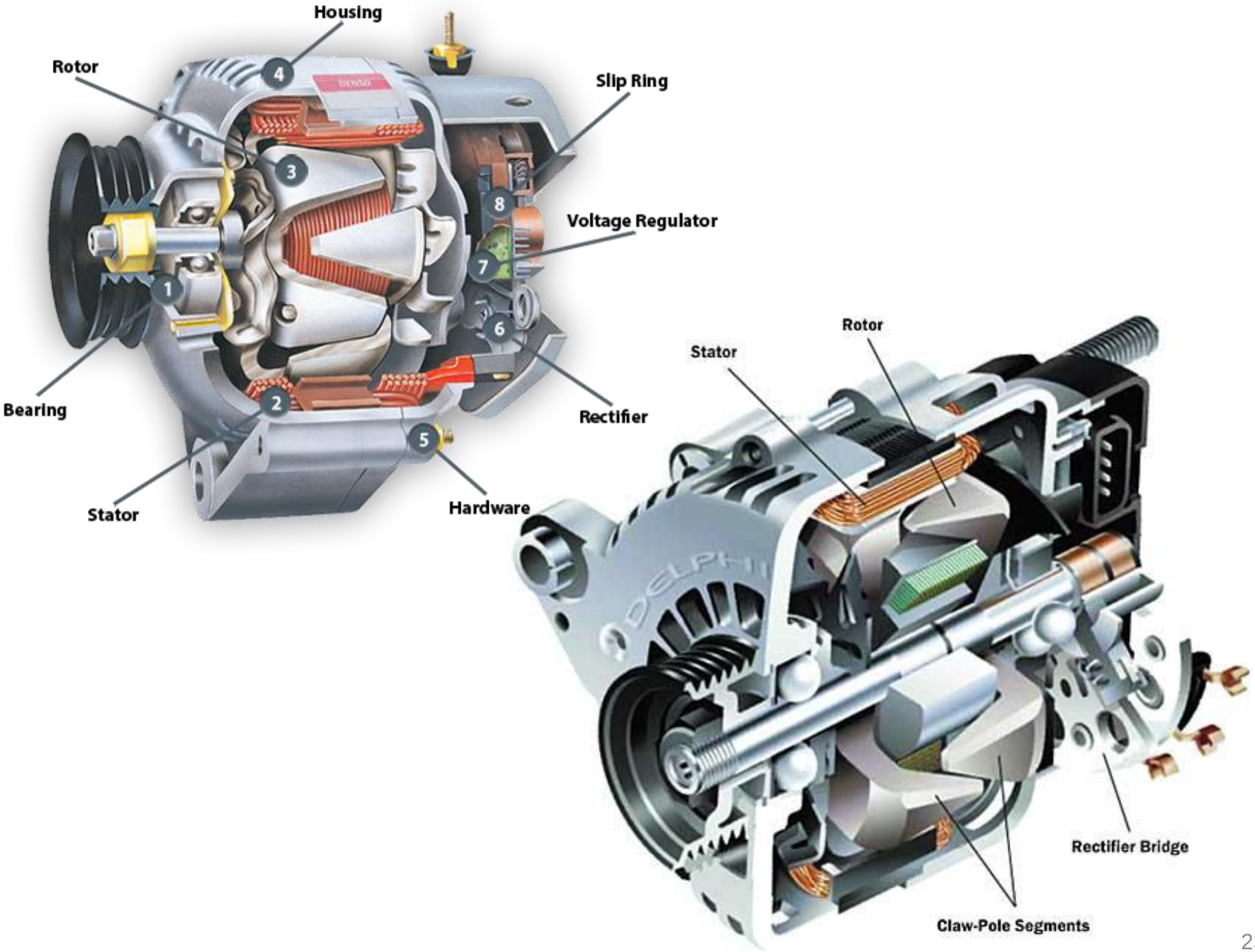


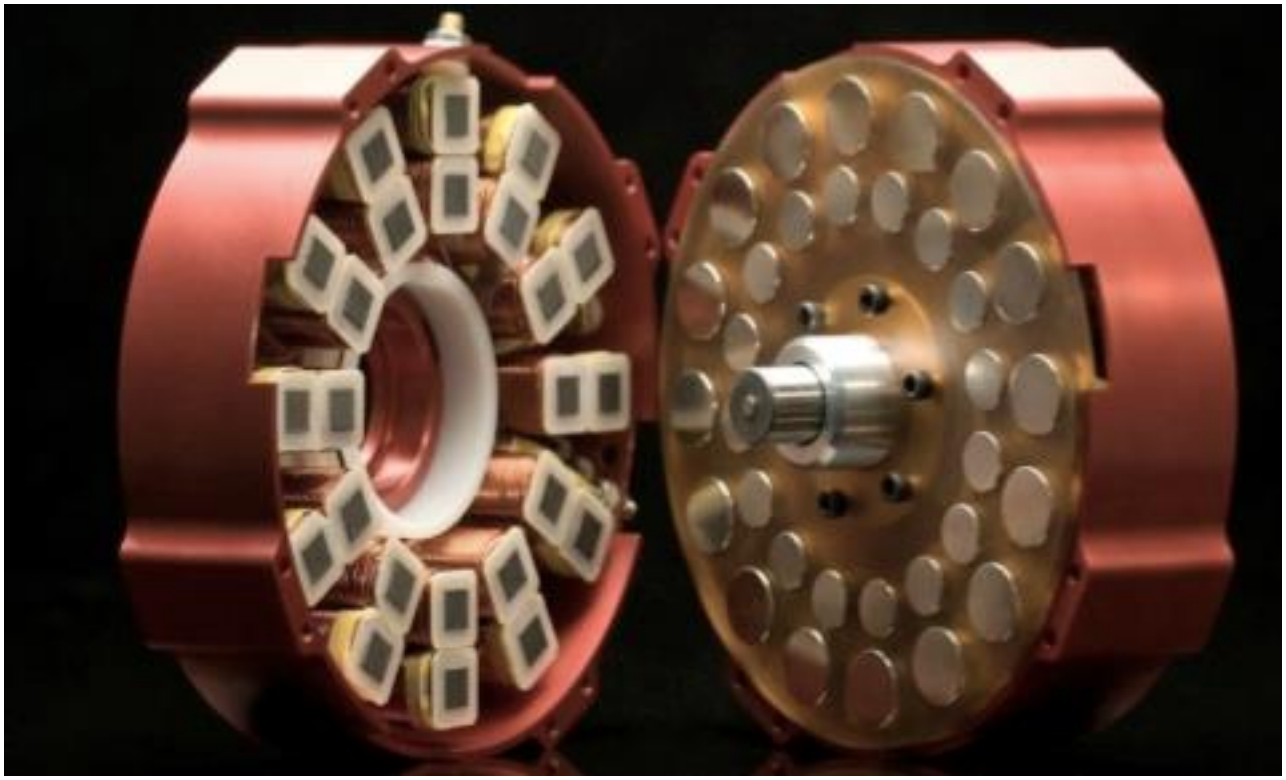

1 High efficient BMW V8 gasoline engine (330kW / 650Nm) with High Precision Injection and TwinPower Turbo.
2 Electric motor (15kW / 210Nm).
3 8-speed automatic transmission.
4 High Voltage Electronics (120 Volts).
5 High voltage wire to battery in trunk.
1
2
3
4
5

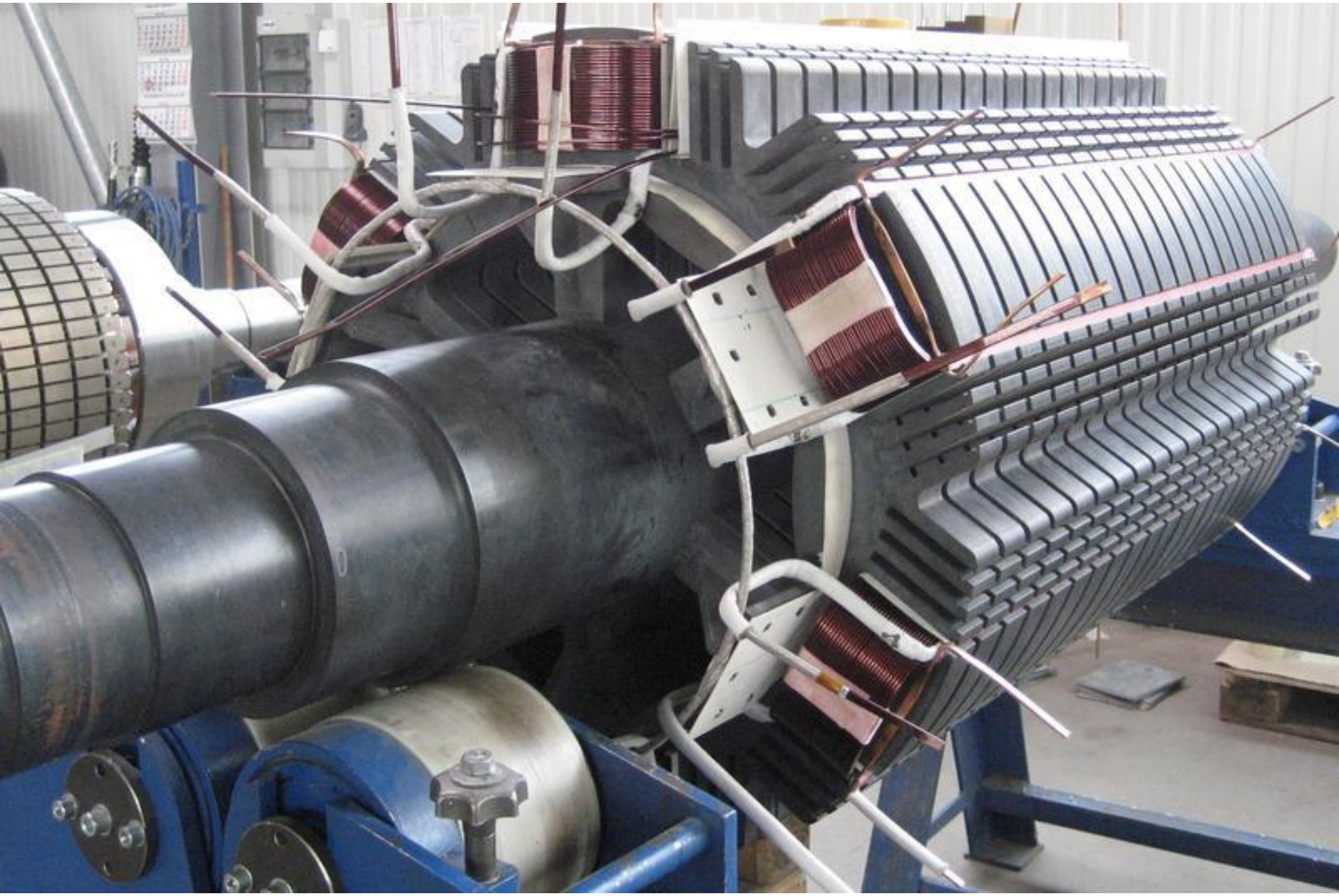

IPMROTOR
STATOR

Alternador

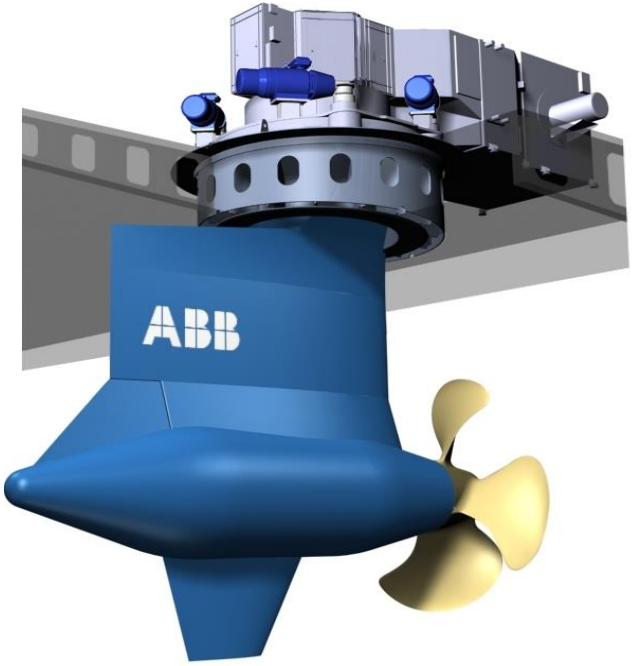

Soporte
Rotor imánes permanentes
Soporte
Polea
Regulador
Rectificador
Nucleo 6 fases

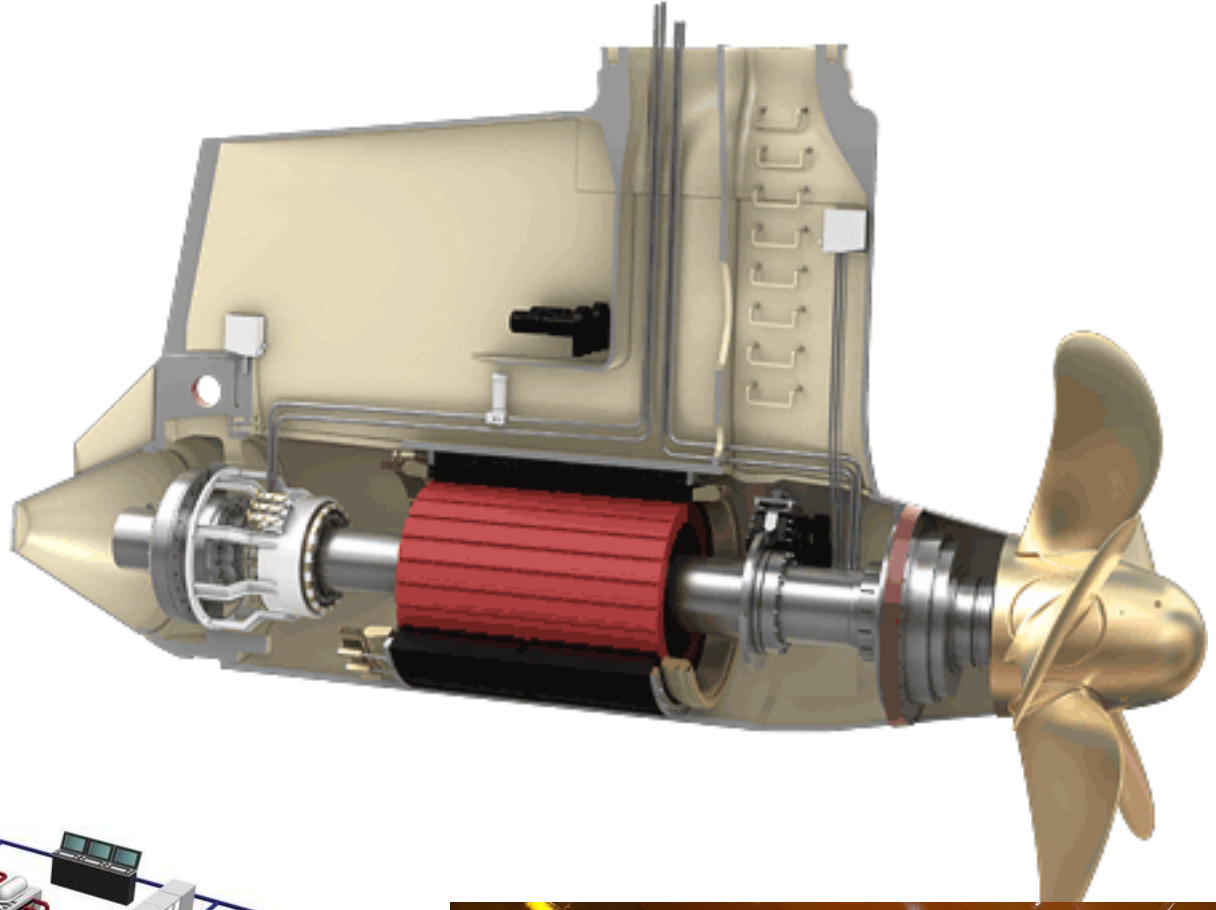

Housing
Rotor
Slip Ring
Voltage Regulator
Bearing
Rectifier
Stator
Hardware
1
2
3
4
5
6
7
8
Rotor
Stator
DELPHI
Rectifier Bridge
Claw-Pole Segments

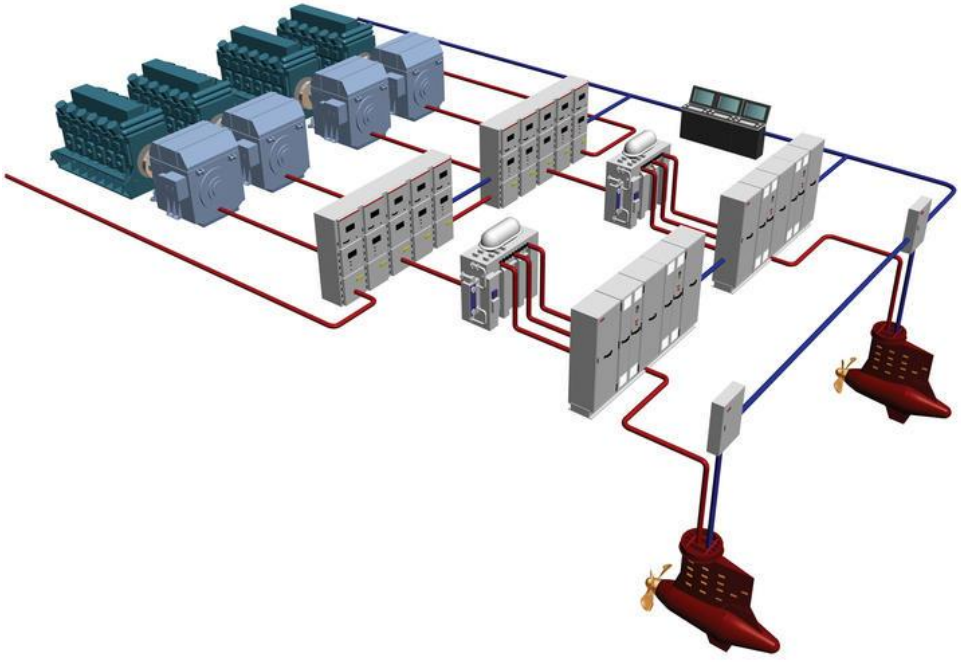





CAP. 70/20 TON


ABB

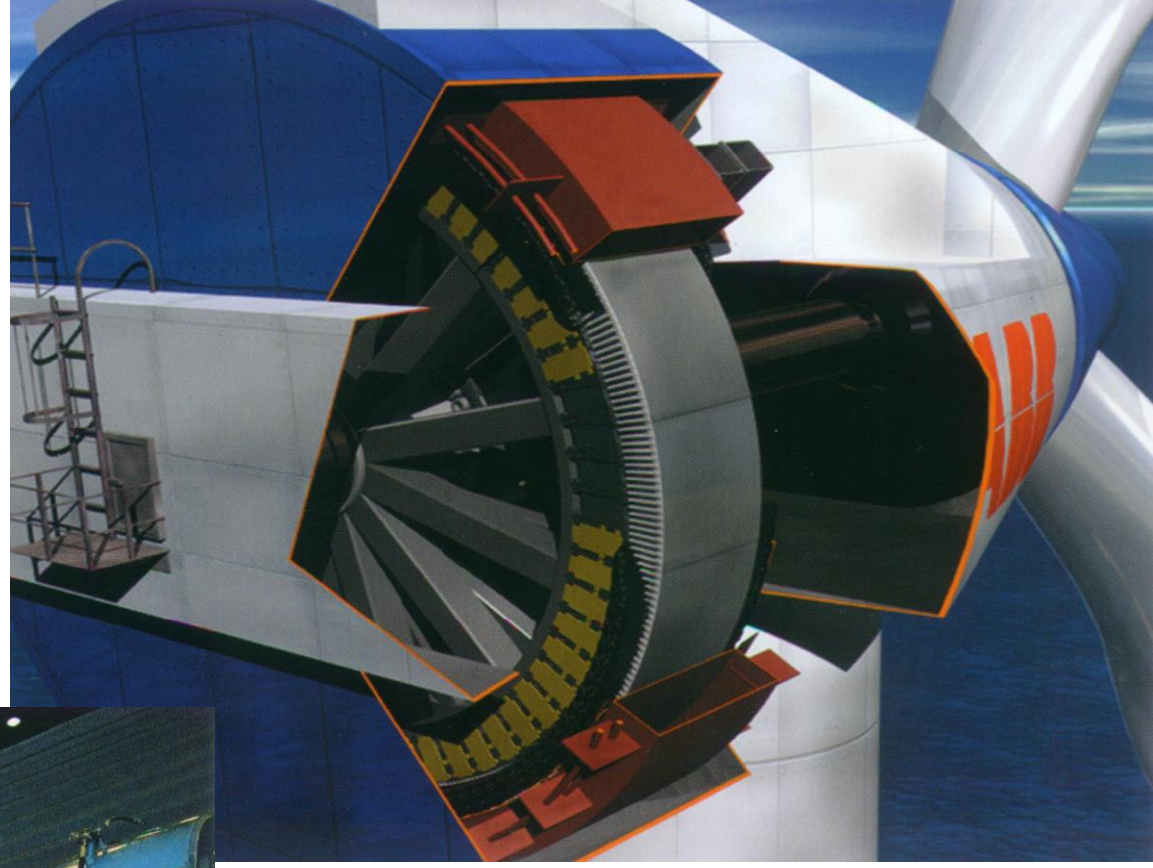


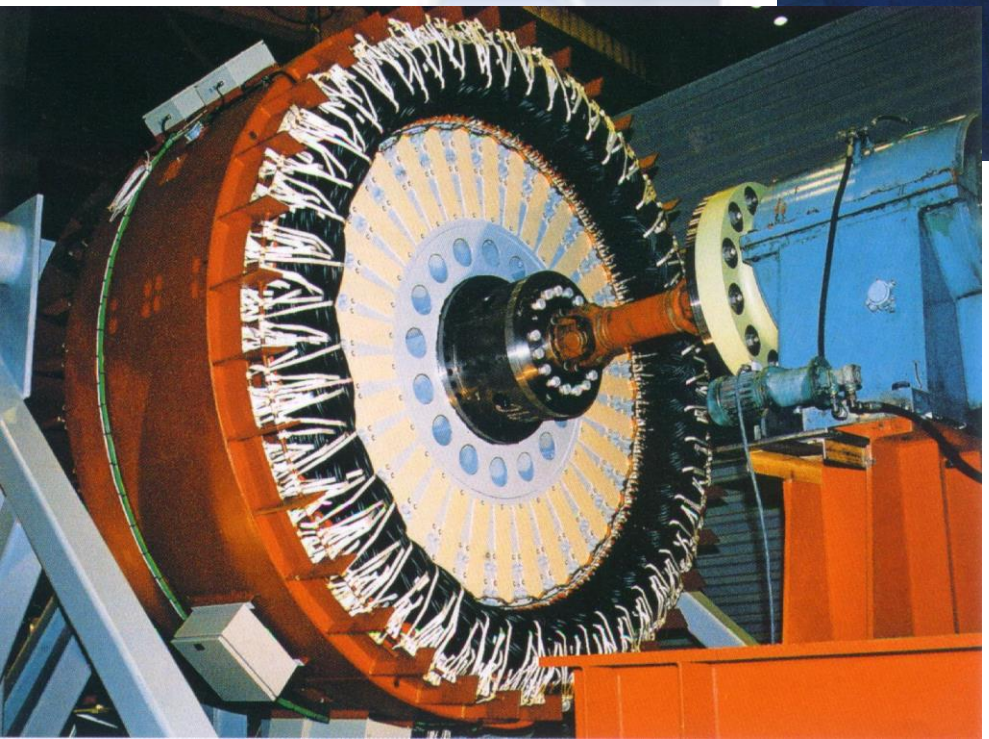


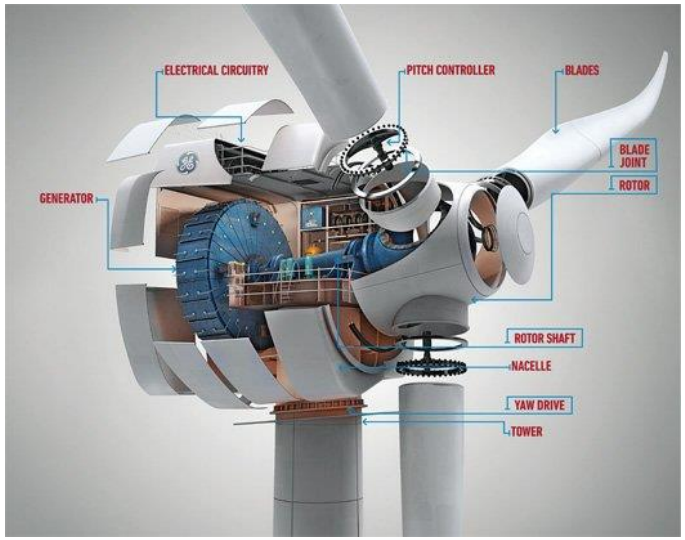




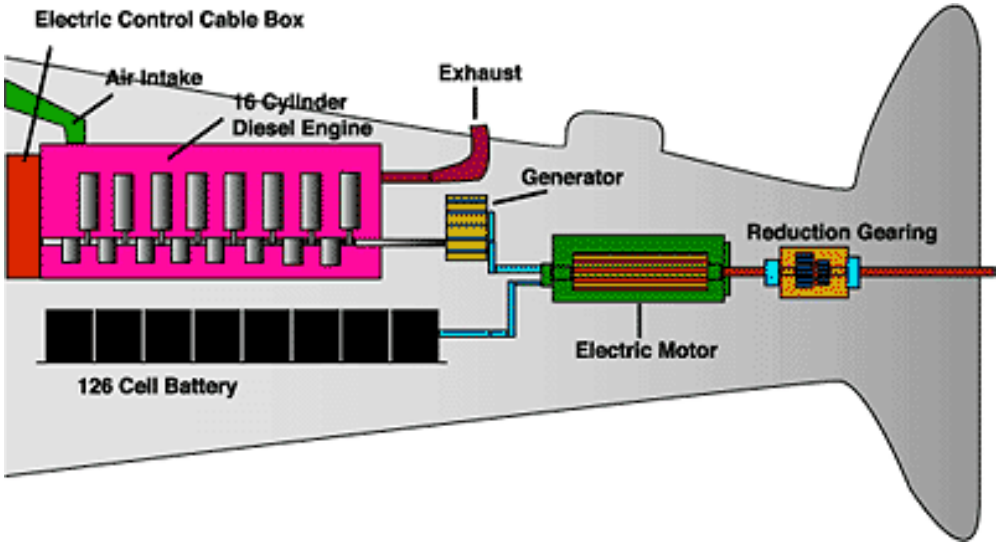




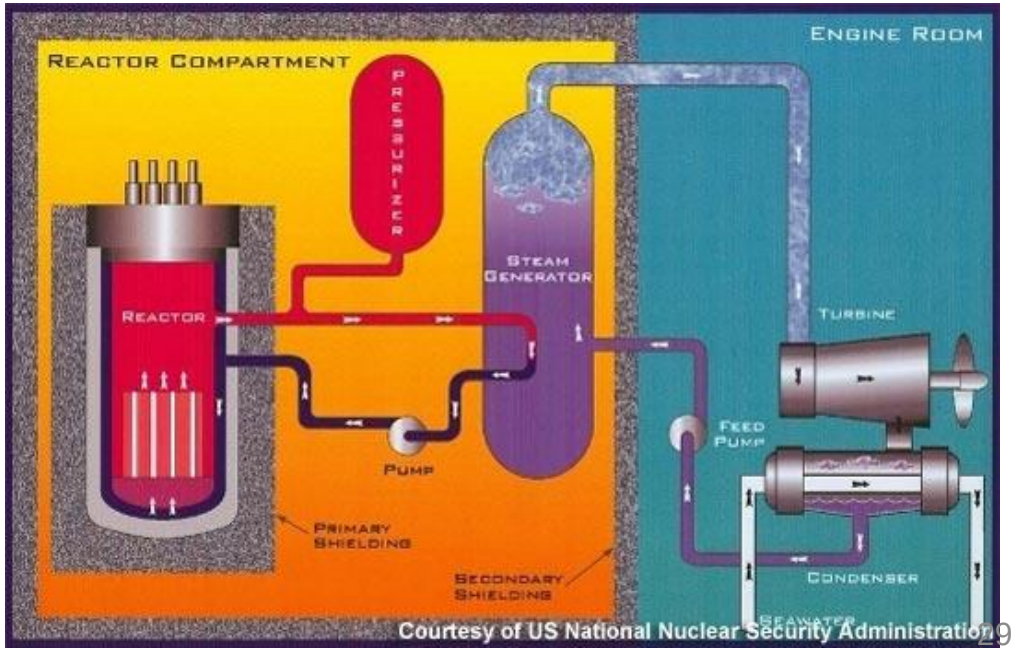



ELECTRICAL CIRCUITRY
PITCH CONTROLLER
BLADES
BLADE JOINT
ROTOR
GENERATOR
ROTOR SHAFT
NACELLE
YAW DRIVE
TOWER





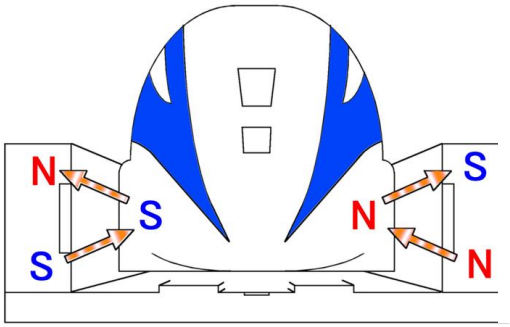


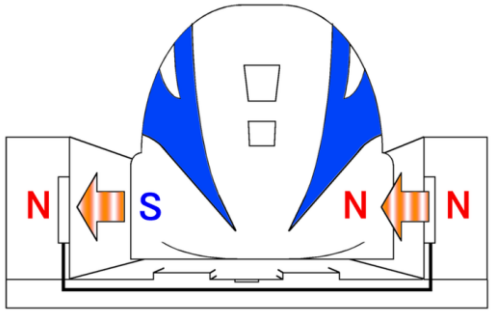


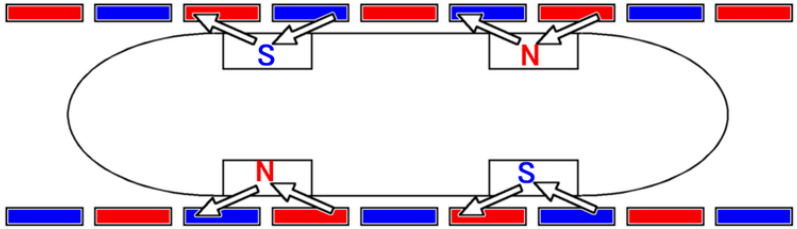
Courtesy of US National Nuclear Security Administration

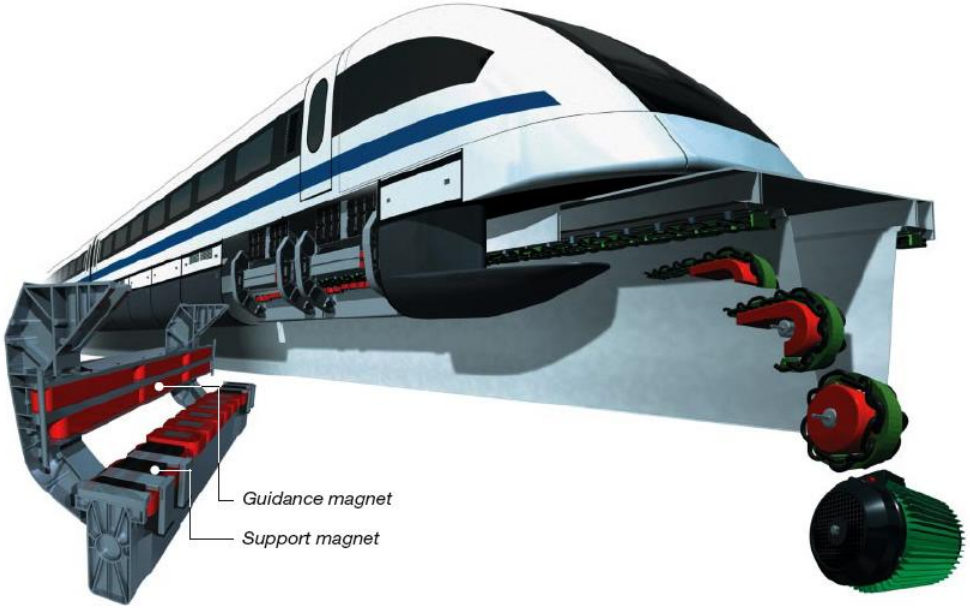


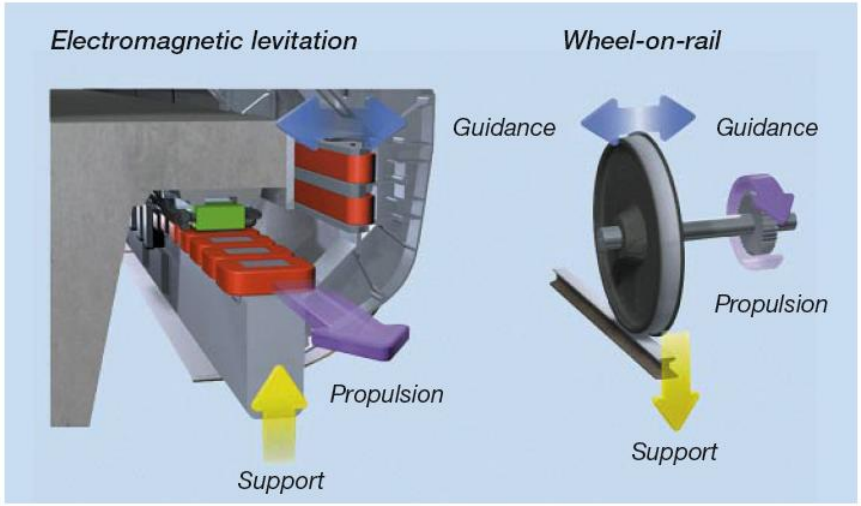



N
S
S
N
N
S


N
S
N
N


S
N
N
S

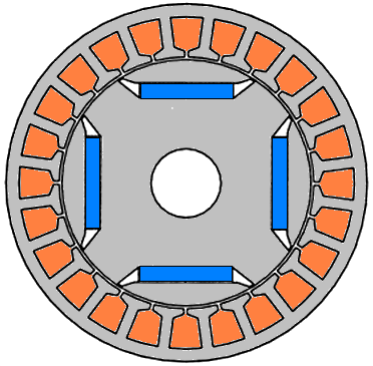

Guidance magnet
Support magnet

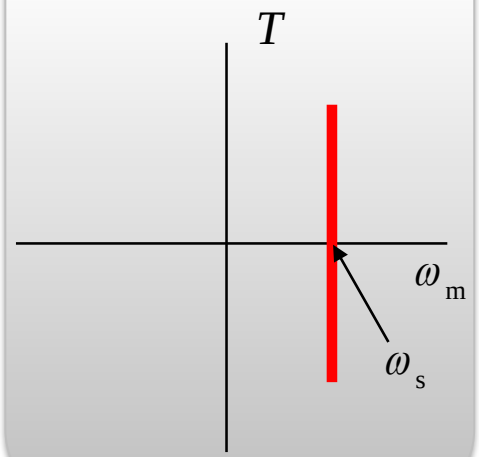

Electromagnetic levitation
Wheel-on-rail
Guidance
Propulsion
Support
Guidance
Propulsion
Support

Principales Máquinas Eléctricas

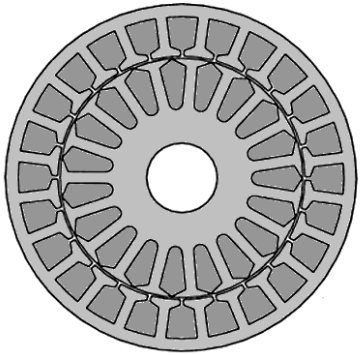
Característica Torque-Velocidad

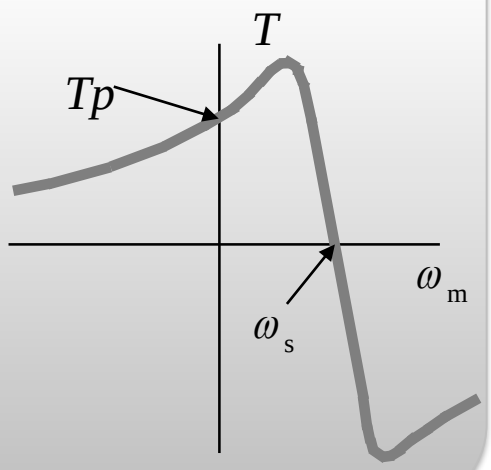
SINCRONA



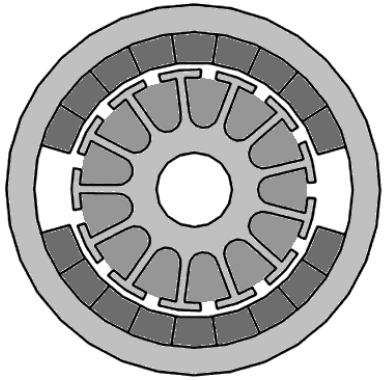


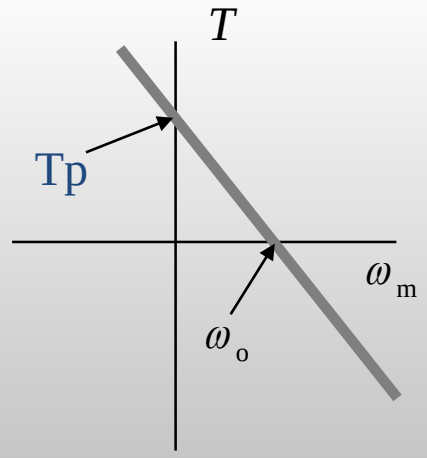
INDUCCION





CONTINUA





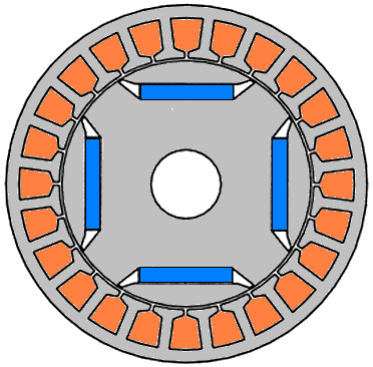
(exc. separada y shunt)

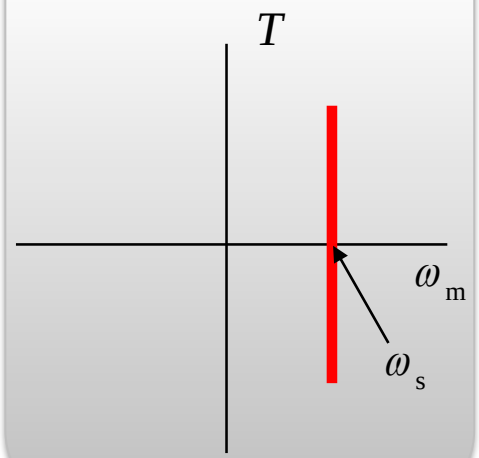
Máquina Síncrona

$$\omega_s = \omega_m = \omega/p$$

Característica Torque-Velocidad

SINCRONA





La condición de existencia de **torque medio** establece que la máquina síncrona sólo tiene torque a velocidad síncrona.

Esto significaba **inconvenientes** para la partida cuando se conectaba a la red ya que se requerían soluciones adicionales como adherir una jaula de ardilla y mantener un torque controlado para no perder la sincronización.

Actualmente la **electrónica de potencia** es la solución, ya que se puede controlar el torque a toda velocidad (frecuencia variable).

$$\omega_s = \omega_m + \omega_r$$

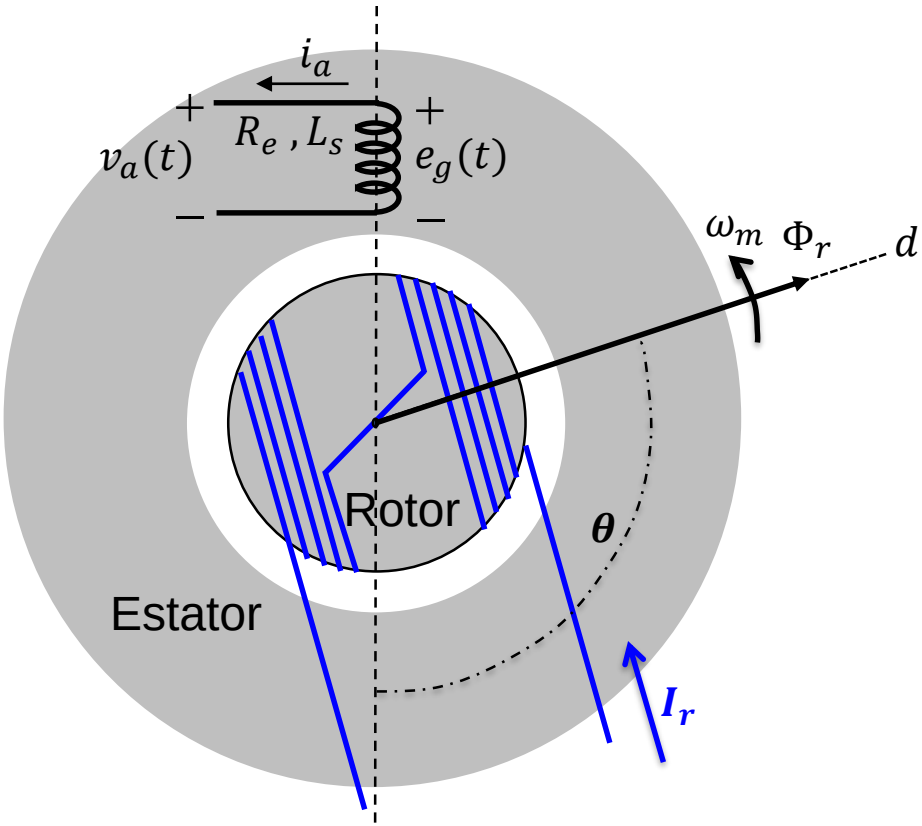
$$\omega_r = 0 \qquad \omega_s = \omega_m$$

Máquina Síncrona

Rotor Cilíndrico (Caso generador)

$\omega_s = \omega_m = \omega/p$

Si analizamos el circuito de una fase como generador tenemos:



Máquina Síncrona

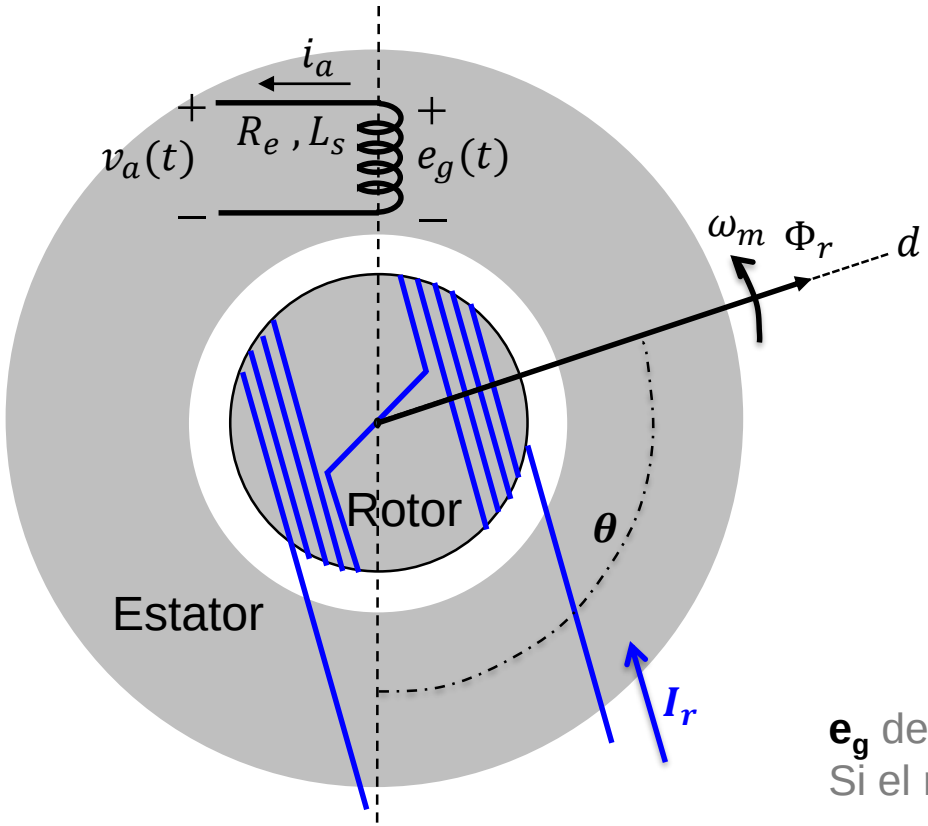
Rotor Cilíndrico (Caso generador)

$$\omega_s = \omega_m = \omega/p$$

Si analizamos el circuito de una fase como generador tenemos:

$$e_g = R_e i_a + L_s \frac{di_a}{dt} + v_a$$

Calculamos e_g por ley de Faraday (mantener convención de signos: la derivada es positiva por el signo invertido en la bobina y el flujo es negativo por la elección de θ en 180º):



$$e_g = N_e \frac{d\phi}{dt}$$

$$\phi = -\Phi_r \cos(\theta \cdot p)$$

$$\theta = \omega_m t = \omega_s t = \frac{\omega t}{p}$$

$$\phi = -\Phi_r \cos \omega t$$

$$\Phi_r = \frac{N_r I_r}{\Re}$$

$$L_{max}^{er} = \frac{N_r N_e}{\Re}$$

$$e_g(t) = I_r \, L_{max}^{er} \cdot \omega \cdot \sin \omega t$$

e_g depende de la corriente rotórica y velocidad.
Si el rotor es un imán sólo depende de la velocidad.

Máquina Síncrona
Rotor Cilíndrico (Caso generador)

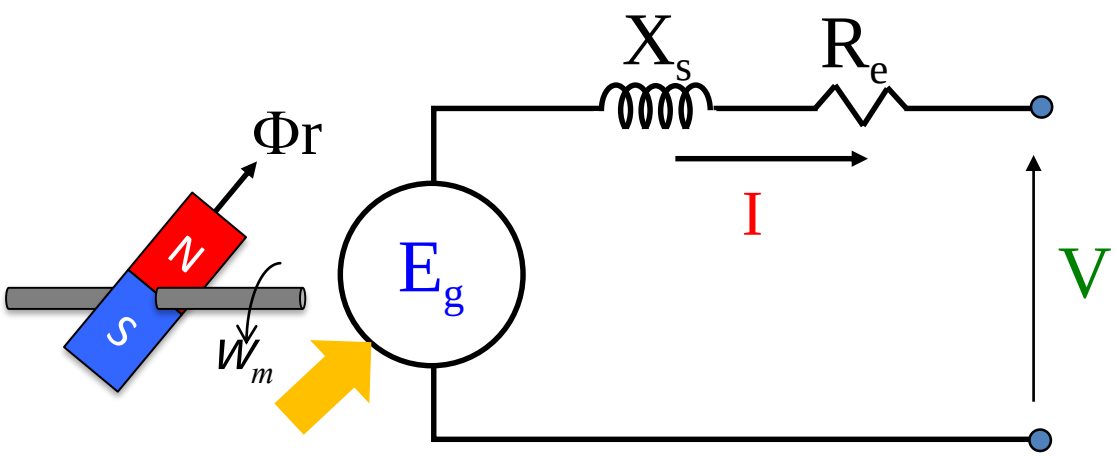
Observación: El voltaje en un inductor es Ldi/dt si el flujo generado por la corriente es auto-inducido (generado por la propia corriente de la bobina). Sin embargo, si hay otro flujo externo que varia en el tiempo y es enlazado por la bobina, tendrá un segundo voltaje inducido externamente llamado e_g.

$$e_g = R_e i_a + L_s \frac{di_a}{dt} + v_a$$

fem inducida por el flujo rotórico

Voltaje de la bobina por flujo auto-inducido (inductor sin flujo enlazado externo)

Circuito Equivalente



Máquina Síncrona

$$\omega_s = \omega_m = \omega/p$$

Rotor Cilíndrico (Caso generador)

Del circuito de una de las fases como generador teníamos:

$$e_g = R_e i_a + L_s \frac{di_a}{dt} + v_a$$

Donde todas la variables son sinusoidales y las otras fases son análogas. Luego, para un análisis en estado estacionario (régimen permanente) podemos trabajar con fasores e incluir todas las fases:

$$\vec{E}_g = R_e \vec{I} + jX_s \vec{I} + \vec{V}$$

Circuito Equivalente

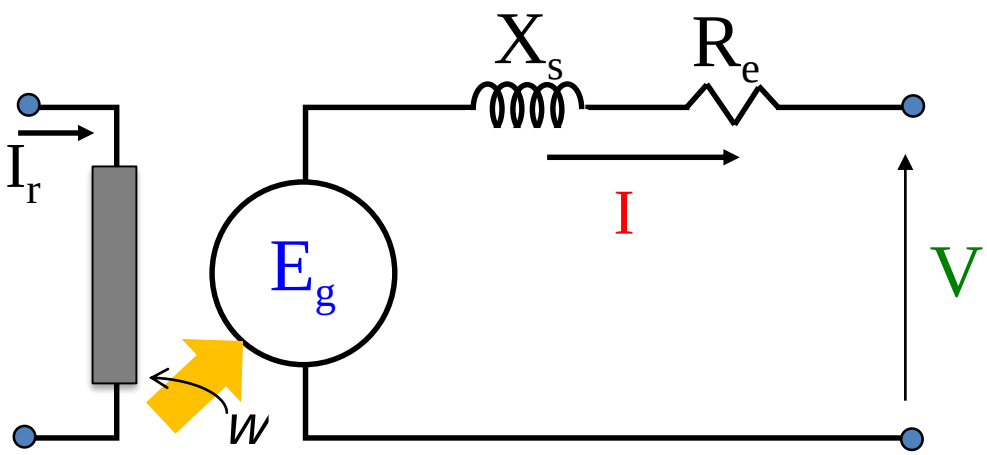
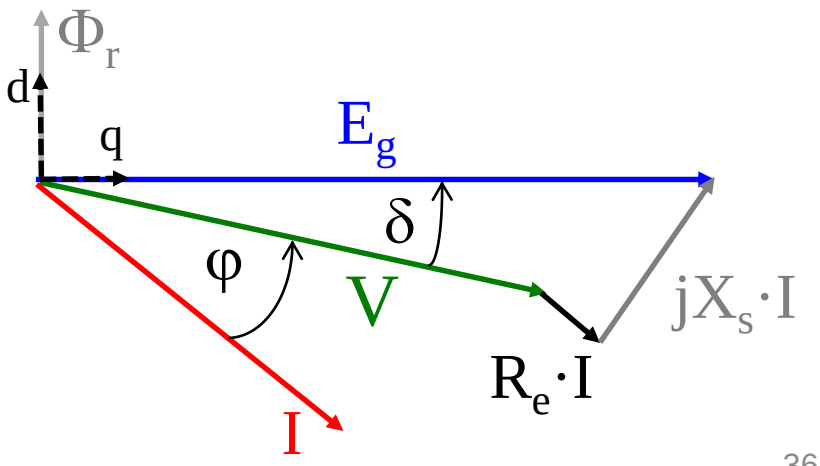


Diagrama Vectorial (Fasorial)

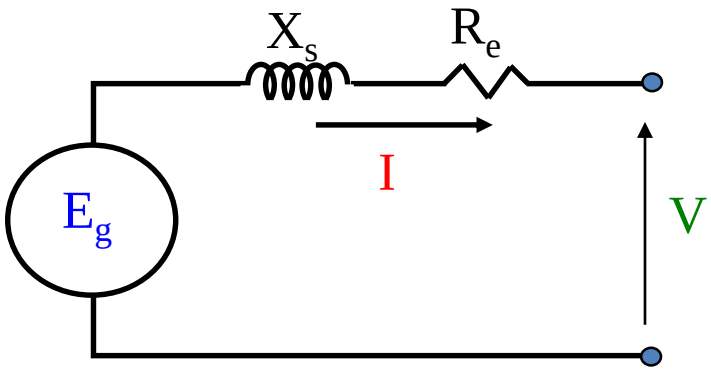


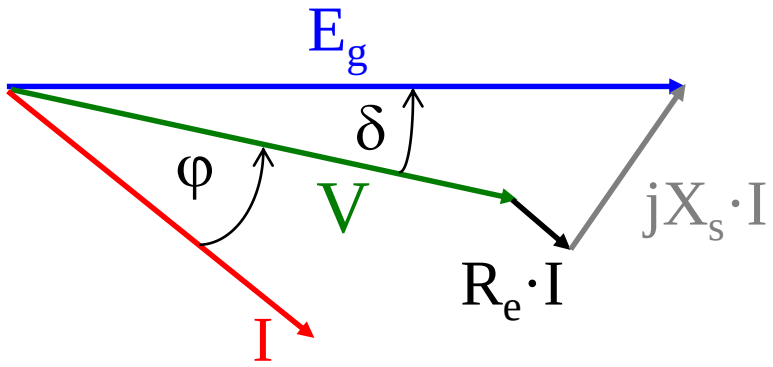
Máquina Síncrona

$\omega_s = \omega_m = \omega/p$

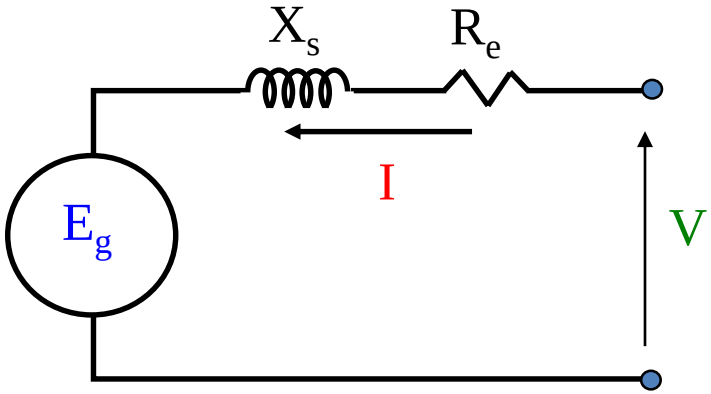
Rotor Cilíndrico (Generador y Motor)

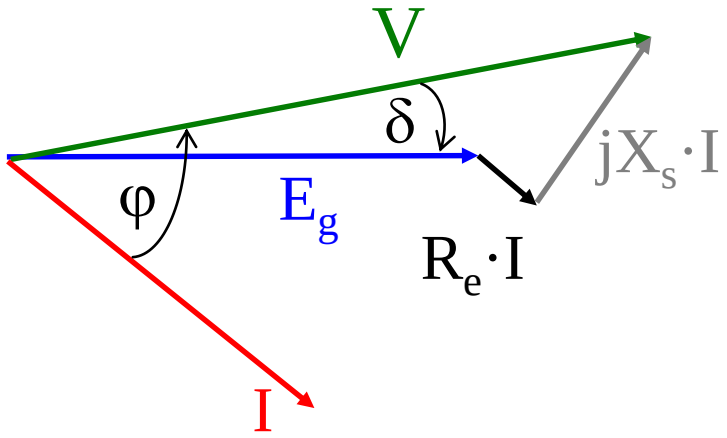
GENERADOR: $\vec{E}_g = R_e\vec{I} + jX_s\vec{I} + \vec{V}$





MOTOR: $\vec{V} = R_e\vec{I} + jX_s\vec{I} + \vec{E}_g$





Máquina Síncrona

Rotor Cilíndrico (Generador y Motor)

$$\omega_s = \omega_m = \omega/p$$

Potencia Activa P (Generador o Motor):

Depende exclusivamente del signo de δ.

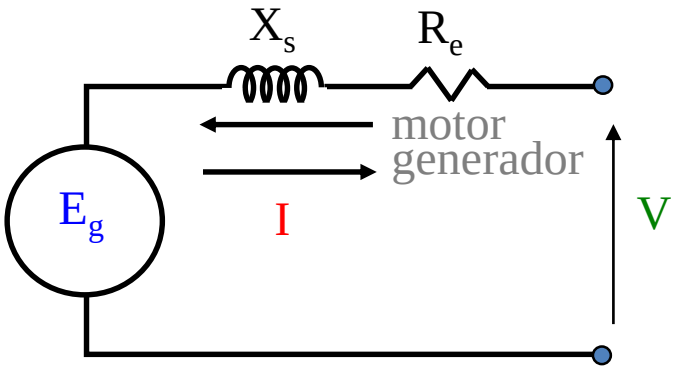
- Si E_g adelanta a V la máquina genera.
- Si E_g se atrasa a V la máquina opera como motor.
- Si están en fase la máquina no entrega ni absorbe potencia activa (no depende de las magnitudes).

Potencia Reactiva Q (FP capacitivo o inductivo):

Depende del ángulo φ (I adelanta o atrasa a V).
Esto se relaciona directamente con la razón entre las magnitudes $|E_g|$ y $|V|$.

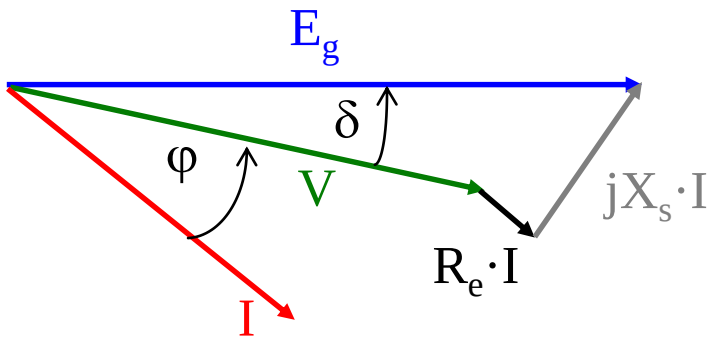
Operación en Vacío:

V y E_g idénticas en fase y magnitud.

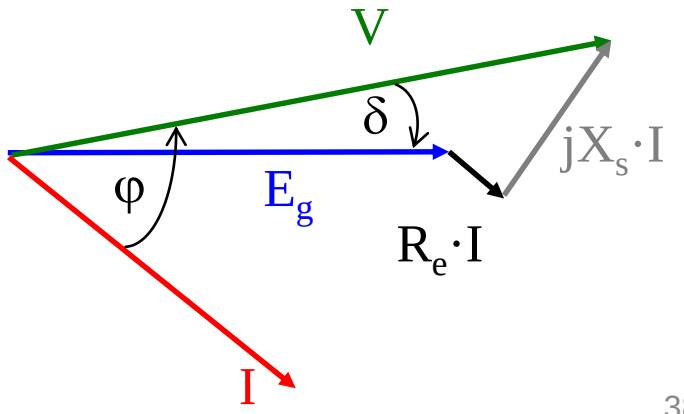


$$\vec{E}_g = E_g \angle \delta$$
$$\vec{V} = V \angle 0°$$
$$\vec{I} = I \angle -\varphi$$

GENERADOR



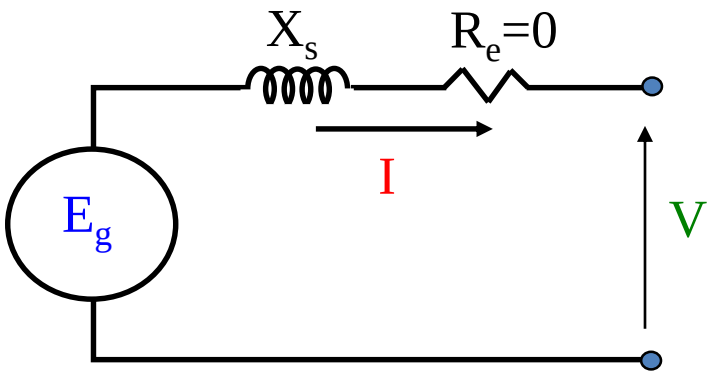
MOTOR

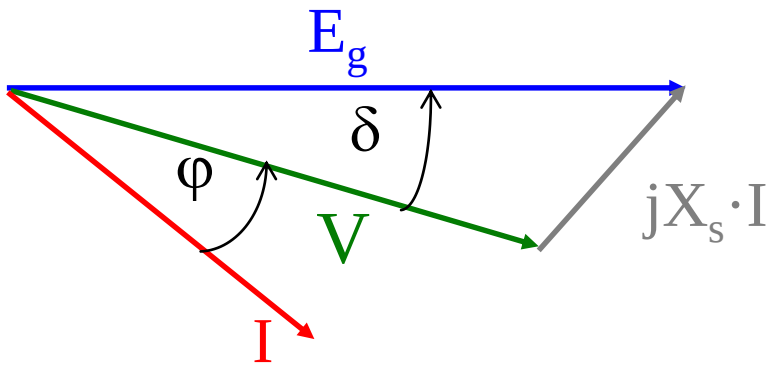


Máquina Síncrona
Rotor Cilíndrico: Potencia y Torque

Despreciamos la resistencia asumiendo ($R_e << X_s$):

$$\vec{E}_g = jX_s\vec{I} + \vec{V}$$





$$E_g \angle \delta = jX_s I \angle -\varphi + V \angle 0$$

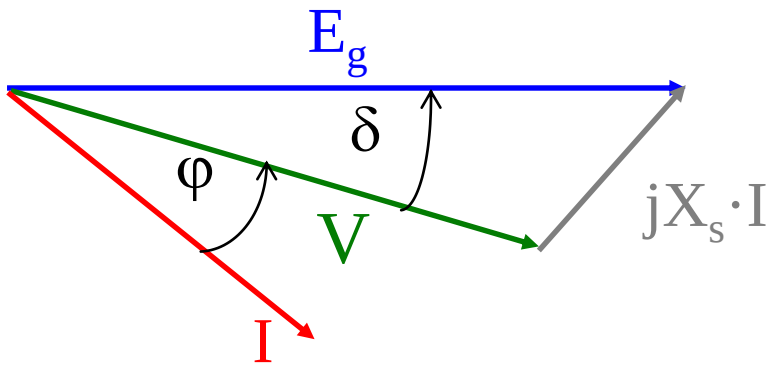
$$E_g\,(\cos\delta + j\,\sin\delta) = jX_s I(\cos\varphi - j\,\sin\varphi) + V$$

$$E_g \cos\delta = X_s I \sin\varphi + V$$

$$E_g \sin\delta = X_s I \cos\varphi$$

Máquina Síncrona
Rotor Cilíndrico: Potencia y Torque

Finalmente tenemos:



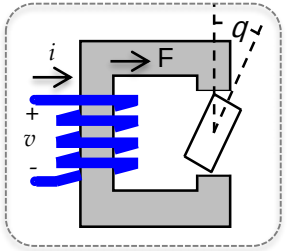
$$E_g \sin\delta = X_s I \cos\varphi \quad \xrightarrow{*\frac{V}{X_s}} \quad \frac{E_g V \sin\delta}{X_s} = VI\cos\varphi \quad \Rightarrow \quad P = \frac{E_g V}{X_s}\sin\delta$$

$$\omega_s = \omega_m \quad \Rightarrow \quad T = \frac{E_g V}{\omega_s X_s}\sin\delta$$

$$E_g \cos\delta = X_s I \sin\varphi + V \quad \xrightarrow{*\frac{V}{X_s}} \quad \frac{E_g V\cos\delta}{X_s} = VI\sin\varphi + \frac{V^2}{X_s} \quad \Rightarrow \quad Q = \frac{E_g V}{X_s}\cos\delta - \frac{V^2}{X_s}$$

Máquina Síncrona

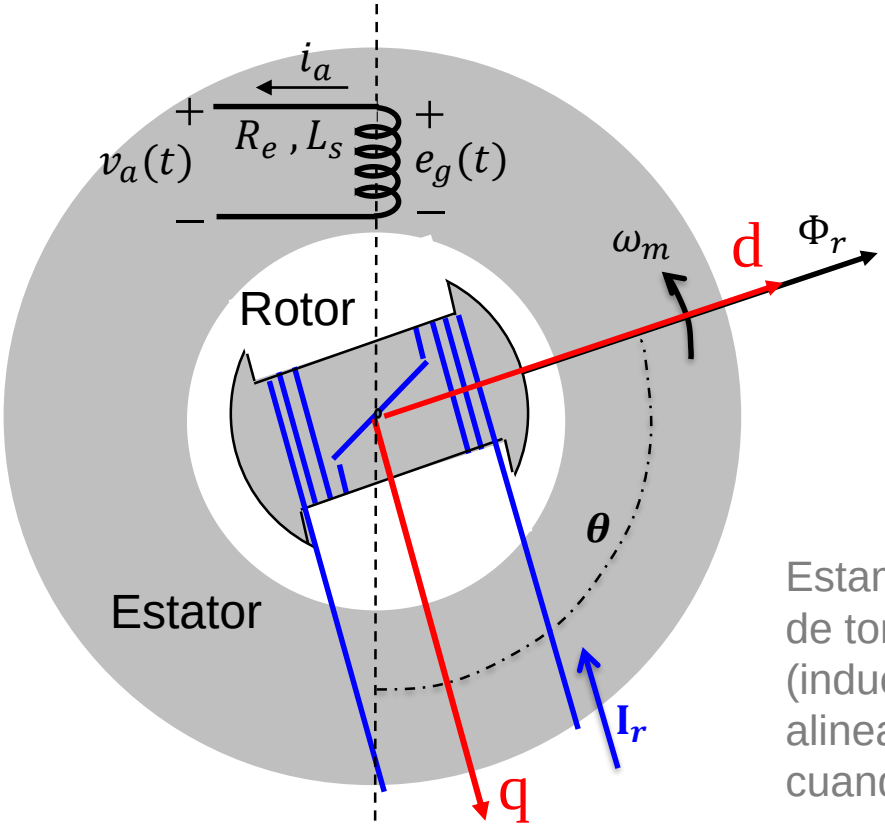
Rotor con Polos Salientes



Si analizamos el circuito de una fase como generador tenemos:

$$e_g = R_e i_a + \frac{d(L_e i_a)}{dt} + v_a$$

Como se vio en la lectura “Máquinas y CMR” sobre la máquina básica, la reluctancia del entrehierro varia con la posición del rotor, lo que genera reluctancia e inductancia con variación sinusoidal como función doble (suponiendo 2 polos) del ángulo mecánico θ:



$$e_g = N_e \frac{d\phi}{dt}$$

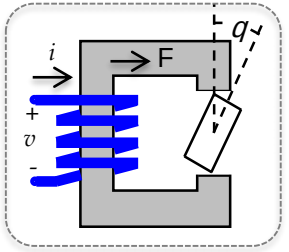
$$\left.\begin{aligned} \phi &= -\Phi_r \cos(\theta \cdot p) \\ \theta &= \omega_m t = \omega_s t = \frac{\omega t}{p} \end{aligned}\right\} \quad \phi = -\Phi_r \cos \omega t$$

$$\Phi_r = \frac{N_r I_r}{\Re(\theta)} \qquad L_{max}^{er} = \frac{N_r N_e}{\Re(\theta)}$$

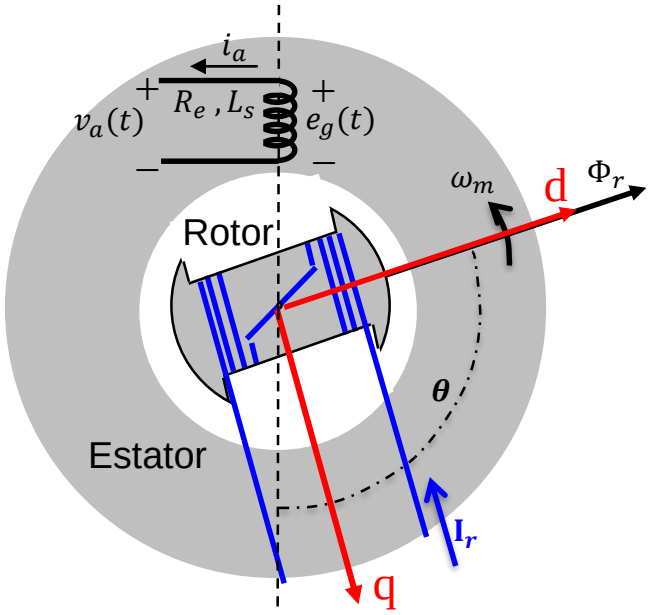
Estamos frente a un motor que tiene una componente de torque de reluctancia. La reluctancia será mínima (inductancia será máxima) cuando el rotor este alineado con el estator (**eje directo “d”**) y viceversa cuando este a 90º (**eje en cuadratura “q”**).

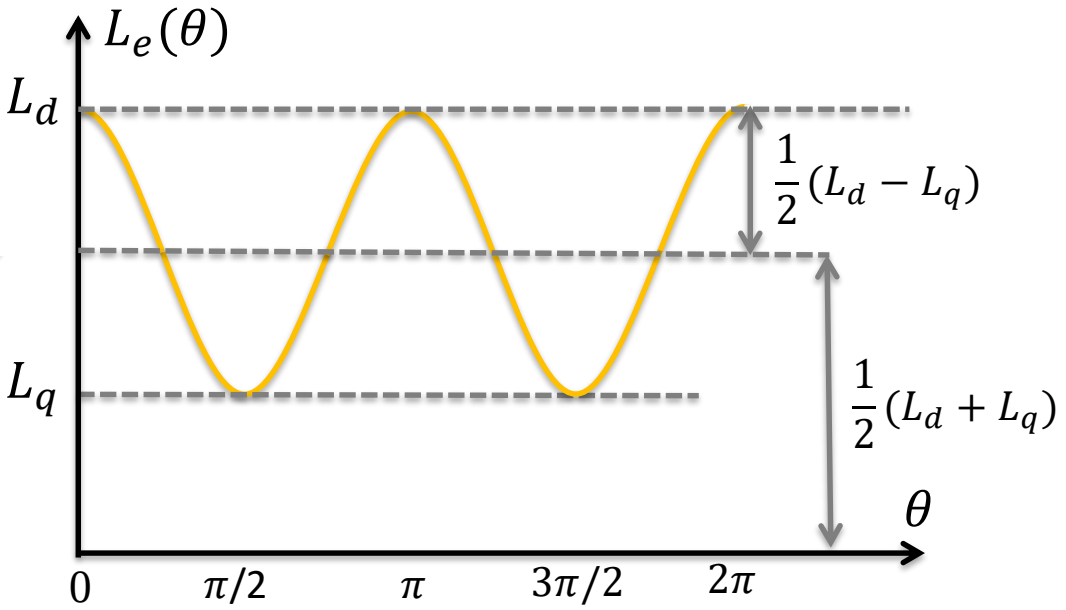
Máquina Síncrona

Rotor con Polos Salientes



El valor de inductancia es máximo cuando el rotor está alineado con el estator (**eje directo "d"**) y es mínimo cuando esté a 90º del estator (**eje en cuadratura "q"**):





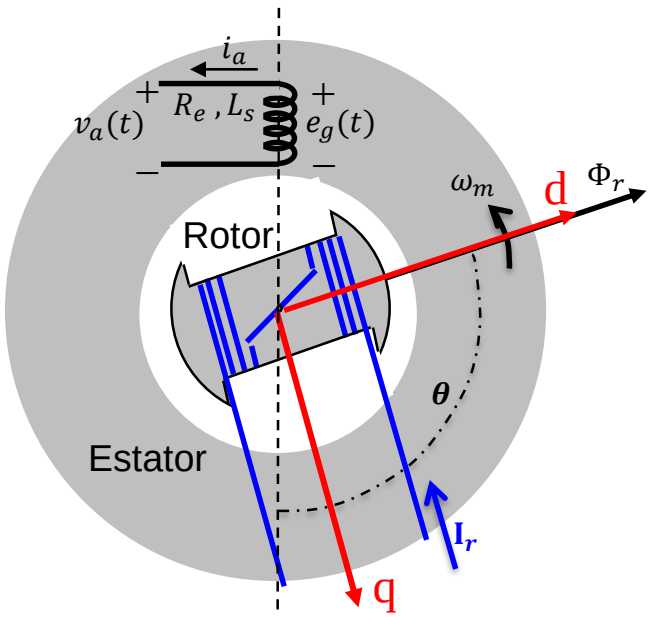
$$L_e(\theta) = L_a + L_b \cos 2\theta \quad \Leftrightarrow \quad L_e(\theta) = \frac{1}{2}(L_d + L_q) + \frac{1}{2}(L_d - L_q)\cos 2\theta$$

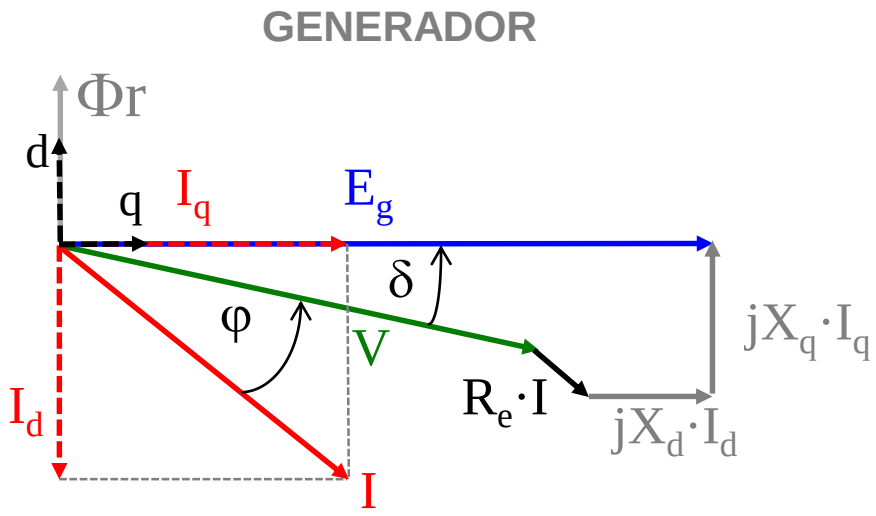
Nota: En algunos rotores se puede dar que Ld<Lq (e.g. Imanes incrustados pueden generar un flujo en dirección "d" pero con una estructura de fierro con reluctancia menor en "q", ya que la permeabilidad de un imán es cercana a la del vacío).

Máquina Síncrona

Rotor con Polos Salientes

Al contrario de la máquina de rotor cilíndrico, esta máquina no tiene un circuito equivalente pero se puede utilizar el circuito de esta última como aproximación. El diagrama fasorial es:





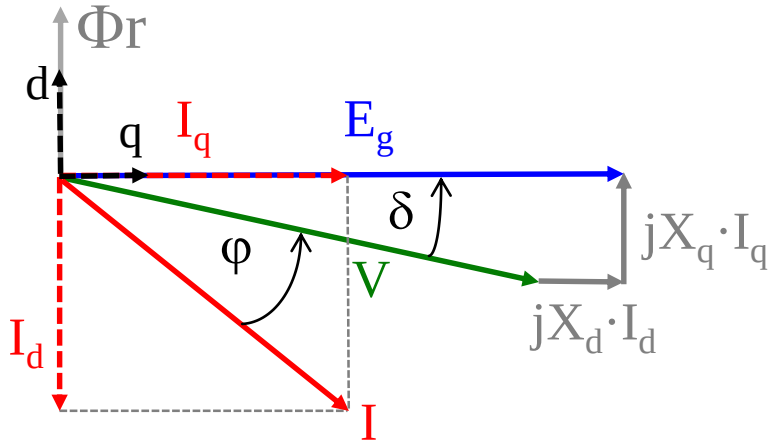
$$e_g = R_e i_a + \frac{d(L_e i_a)}{dt} + v_a$$

$$\vec{E}_g = R_e \vec{I} + jX_d \vec{I}_d + jX_q \vec{I}_q + \vec{V}$$

Máquina Síncrona
Polos Salientes: Potencia y Torque

Para polos salientes tenemos: $R_e << X_{d,}\ R_e << X_q$

Tarea: demostrar P y Q de esta máquina:



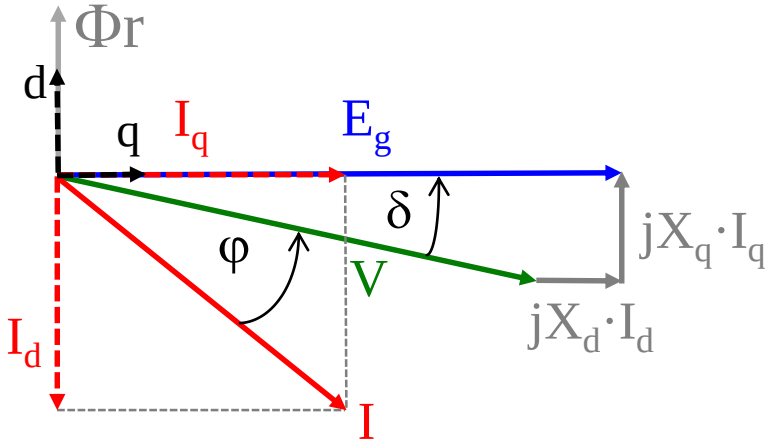
$$P = \frac{E_g V}{X_d} \sin\delta + \frac{V^2}{2}\left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right)\sin 2\delta$$

Máquina Síncrona
Polos Salientes: Potencia y Torque

Para polos salientes tenemos:

$R_e << X_d$

$R_e << X_q$



$$P = \frac{E_g V}{X_d}\sin\delta + \frac{V^2}{2}\left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right)\sin 2\delta$$

$$Q = \frac{E_g V}{X_d}\cos\delta - V^2\left(\frac{\cos^2\delta}{X_d} + \frac{\sin^2\delta}{X_q}\right)$$

$\omega_s = \omega_m$ ➡

$$T = \frac{E_g V}{\omega_s X_d}\sin\delta + \frac{V^2}{2\omega_s}\left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right)\sin 2\delta$$

Torque "inducido"

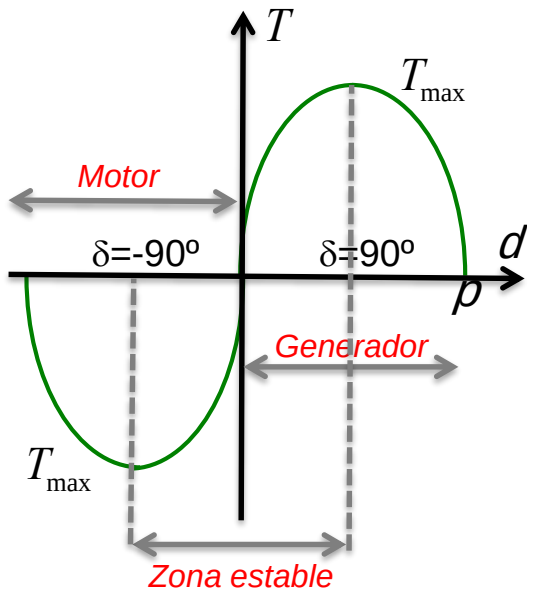
Torque de reluctancia

De estas ecuaciones se pueden obtener las del rotor cilíndrico cuando **Xd=Xq=Xs**

Máquina Síncrona

Torque vs ángulo de carga (δ)

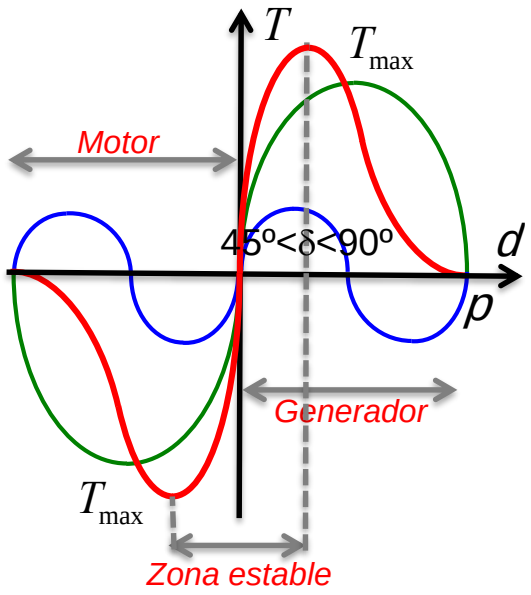
Rotor Cilíndrico



$$T = \frac{E_g V}{\omega_s X_s} \sin\delta$$

Torque "inducido"

Rotor Polos Salientes



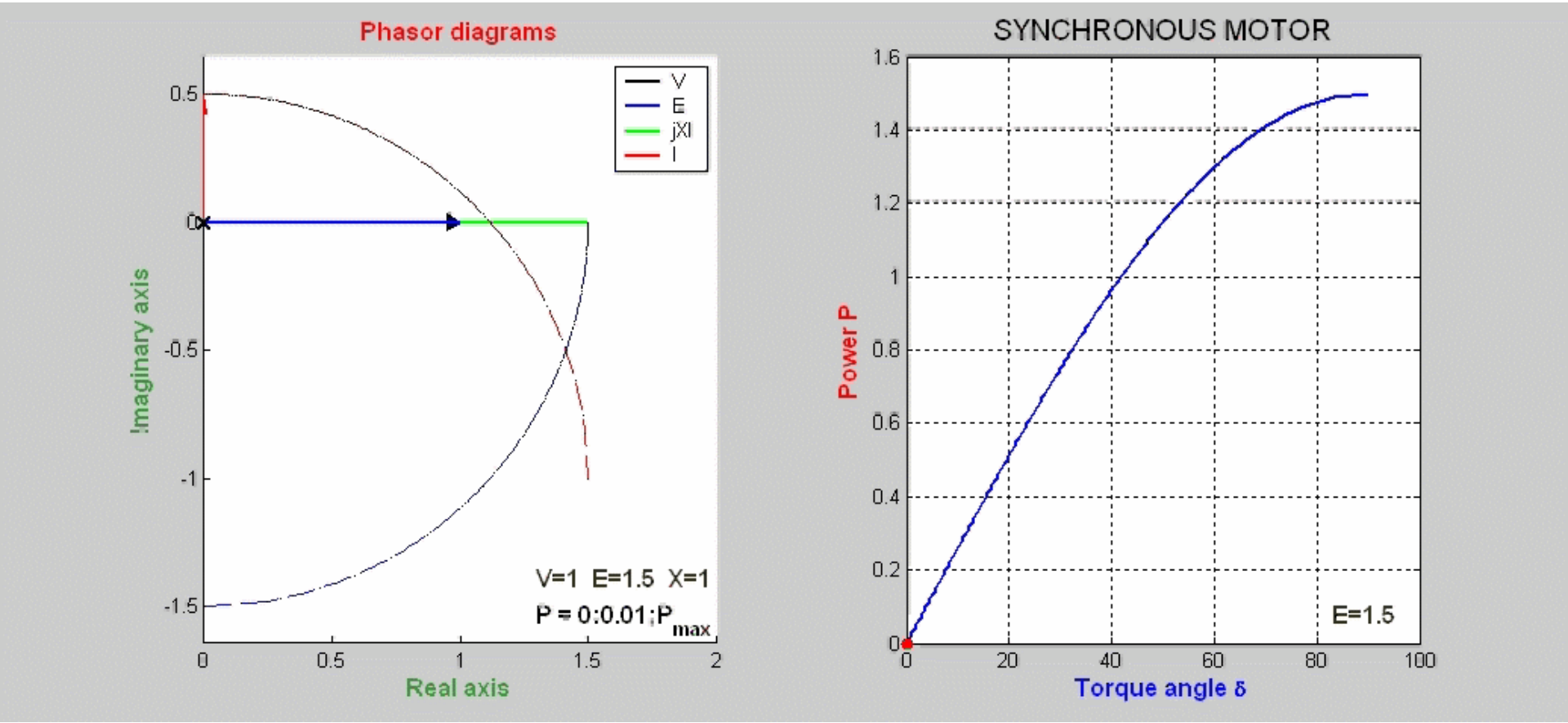
$$T = \frac{E_g V}{\omega_s X_d} \sin\delta + \frac{V^2}{2\omega_s}\left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right)\sin 2\delta$$

Torque "inducido" **Torque de reluctancia**

Nota: no confundir estas características con las de Torque-Velocidad

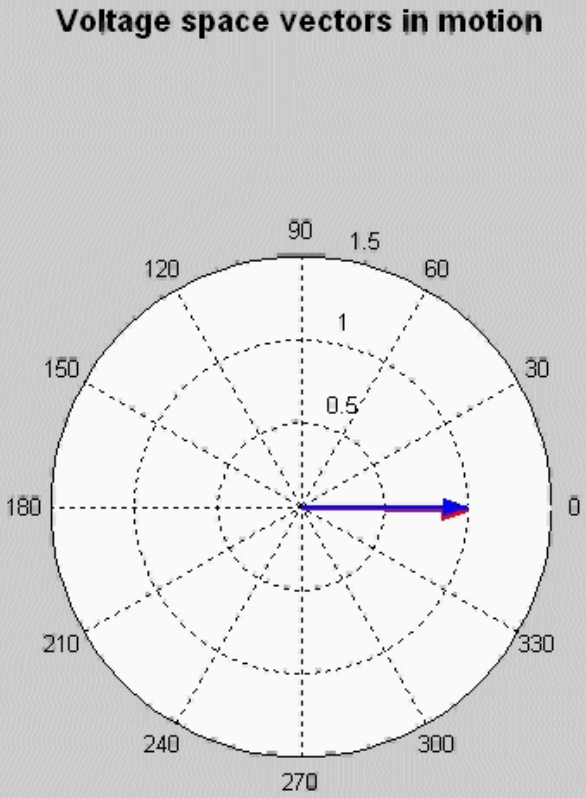
Máquina Síncrona

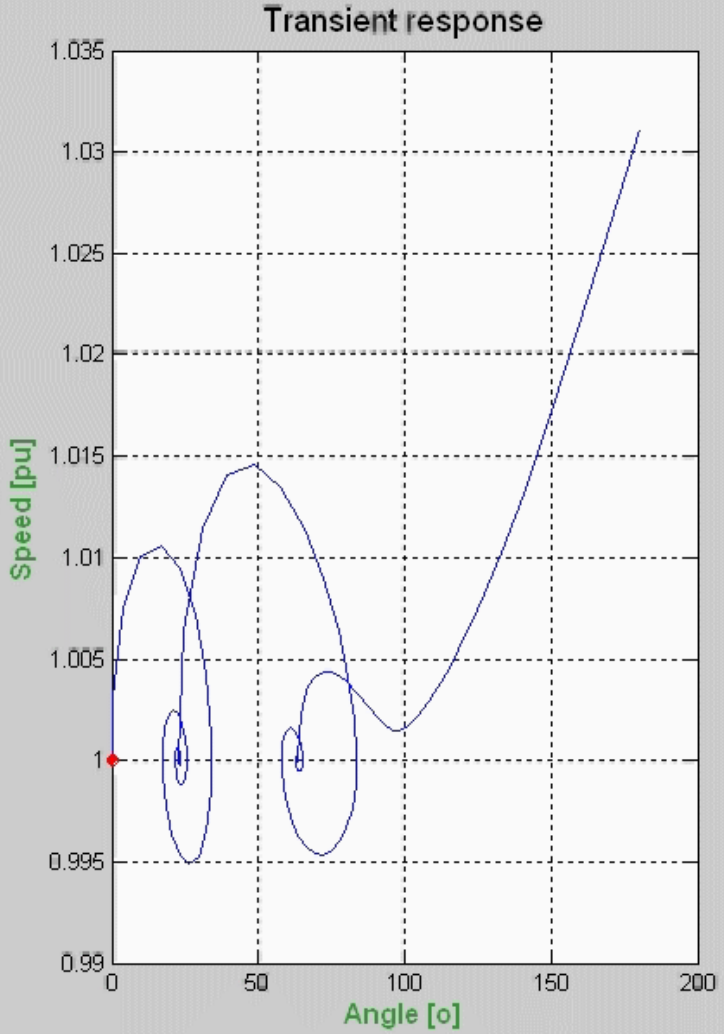
Torque vs ángulo de carga (δ)



Máquina Síncrona

Estabilidad (δ)



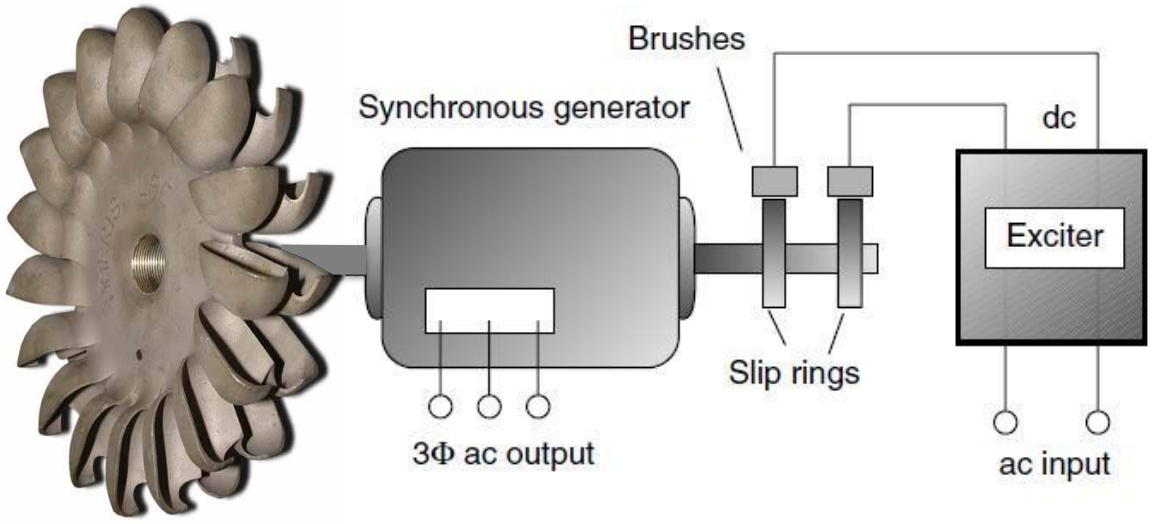


Máquina Síncrona

Conexión a una Red Aislada

Generador conectado a una red aislada:

Es común utilizar generadores síncronos para alimentar cargas aislada en lugares sin disponibilidad de red, en **industrias, hospitales, aviones, barcos y camiones mineros** con grupos electrógenos. En estos casos el generador impone la frecuencia y voltaje de la red y la carga impone la corriente y su fase (factor de potencia). Por lo tanto, si el generador está controlado adecuadamente con valores de frecuencia y voltaje fijos, la potencia también estará determinada por la carga.



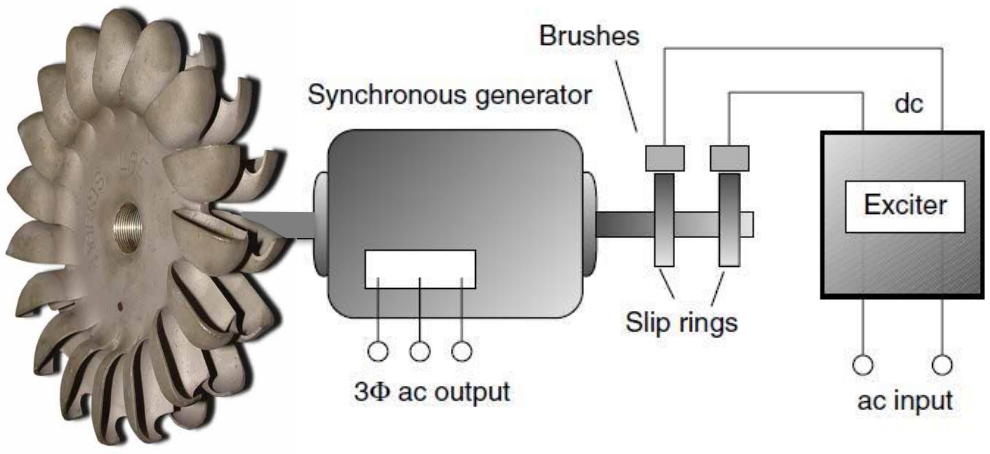
Máquina Síncrona
Conexión a una Red Aislada

Control de la red aislada para mantener el voltaje y frecuencia nominal:

- Para mantener la **frecuencia** fija (e.g 50Hz) el generador debe funcionar a velocidad fija mediante un control del sistema generador ($\omega_m=\omega_s=\omega/p$): La potencia activa dependerá exclusivamente del **torque mecánico entregado**.
- El **factor de potencia y corriente** depende de la **carga**.
- El **voltaje de la red** dependerá sólo de la **corriente de excitación** y del inducido porque se supone que la velocidad es fija (controlada) y el f.p está determinado por la carga.

Resumen:

- **Control de P**: el control del sistema-generador mide la frecuencia de la red y ajusta el torque mecánico para mantenerla.
- **Control de Q**: el control del sistema-generador mide el voltaje de la red y ajusta la corriente de la excitatriz para mantenerla.



Ejemplo: **Control de velocidad**



Pelton Rotor



Turgo Rotor



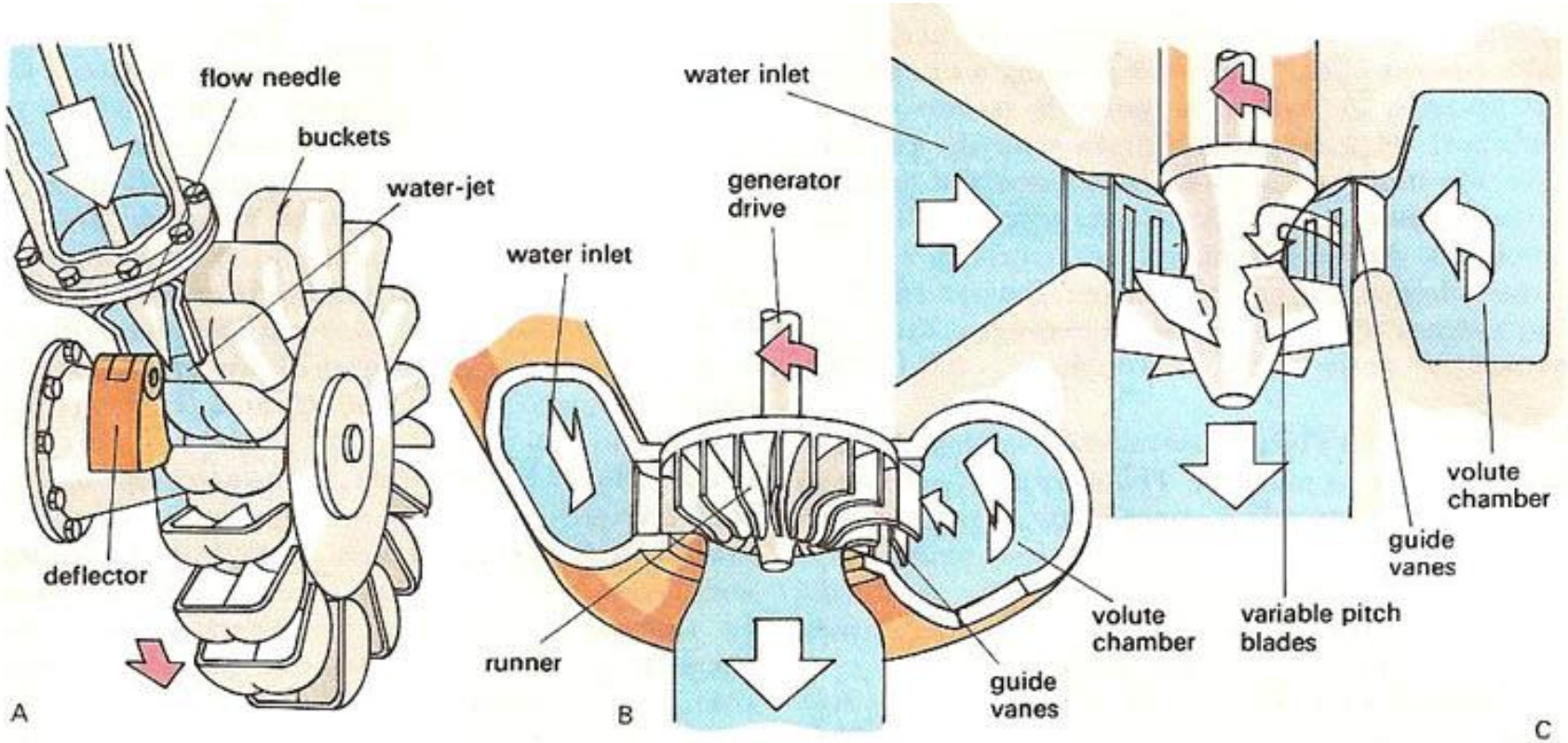
Francis Rotor



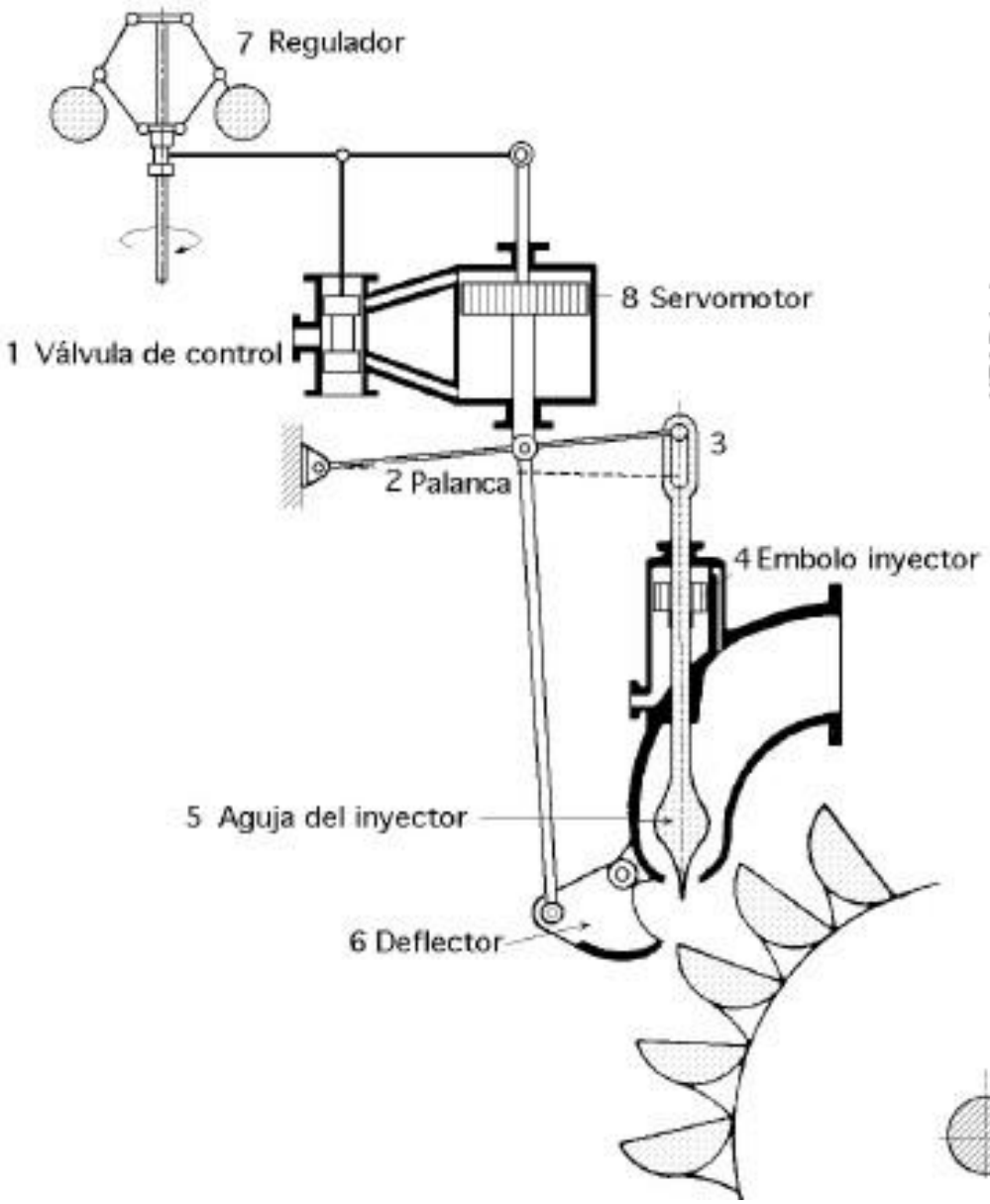
Kaplan Rotor

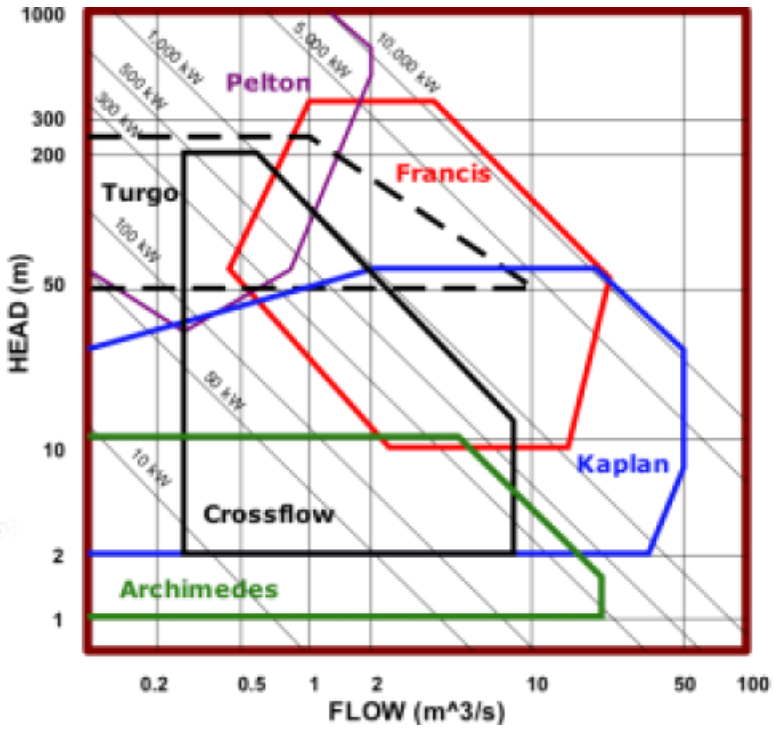


Crossflow Rotor



Ejemplo: Control de velocidad





Generador Síncrono

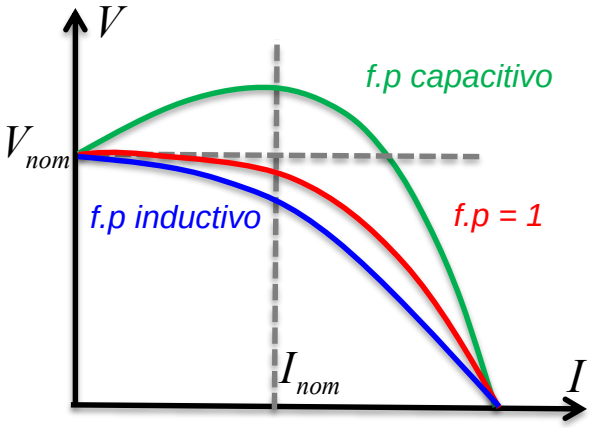
Regulación de Voltaje

Regulación de voltaje de un generador: Se define como la razón de cambio del voltaje en los bornes de la máquina desde la operación en vacío (sin carga) hasta su operación nominal (plena carga) para una excitación específica.

$$\varepsilon = \frac{E_0 - V}{V} \times 100\%$$

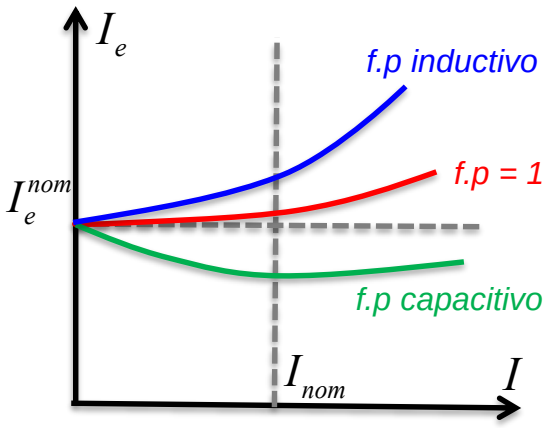
La regulación de carga dependerá del tipo de carga alimentada. Para cargas inductivas y resistivas el voltaje en bornes es menor que el voltaje inducido (ε>0), y para cargas capacitivas el voltaje en bornes es mayor que el inducido (ε<0).

Curva o característica exterior



Las cargas inductivas y resistivas reducen el voltaje porque generan un efecto desmagnetizante del fmm total (fmm inducido en contrafase del fmm inductor). Cargas capacitivas aumentan el efecto magnetizante pero el voltaje igual se reduce si la corriente es mayor a la nom. por caída en R_e y en la reactancia X_s.

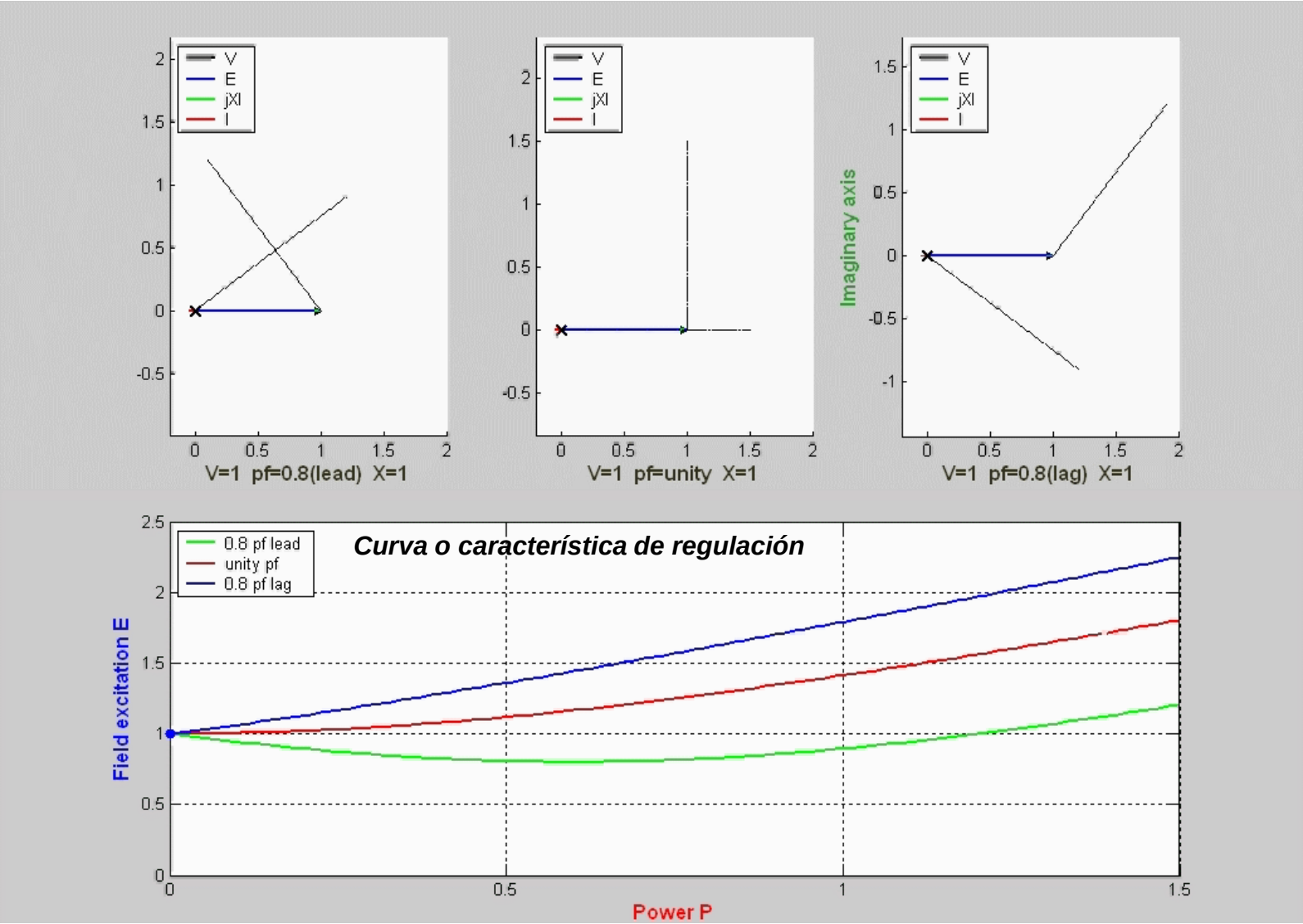
Curva o característica de regulación



Curvas de la excitación I_e (rotor) para mantener el voltaje constante a diferentes corrientes de estator. Al regular el voltaje con I_e controlamos el Q generado.

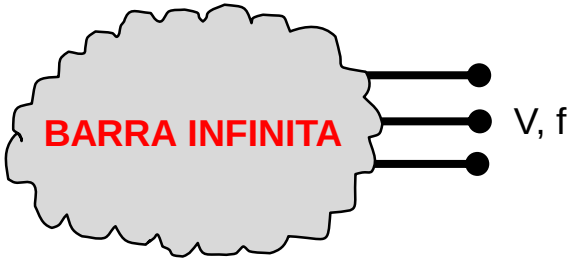
Generador Síncrono

Regulación de Voltaje



Máquina Síncrona

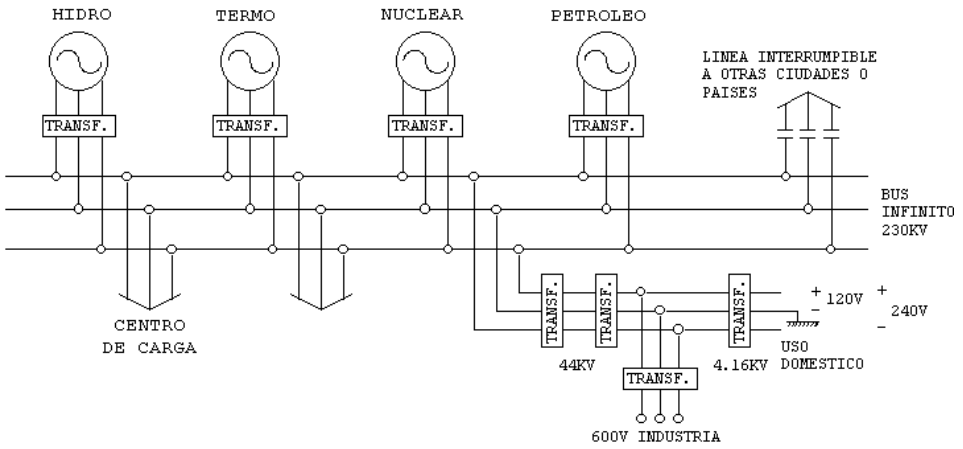
Conexión a una Barra Infinita



Barra Infinita: Sistema que posee una frecuencia y voltaje fijos (red de potencia infinita). Un sistema eléctrico (red) de tamaño considerable como el SIC ó el SING (SIN) puede considerarse una barra infinita. Si una máquina relativamente pequeña en comparación al sistema es conectada a la red, entonces la frecuencia y voltaje de sus bornes estará impuesta por las de la red.

Conexión de una máquina síncrona a una barra infinita: Como la barra infinita tiene una frecuencia y voltaje fijos, la conexión de una máquina síncrona a la red (motor o generador) debe ser realizada de forma sincronizada mediante métodos especiales.





Generador Síncrono
Conexión a una Barra Infinita



Conexión de un generador síncrono: debe ser conectado cuando su voltaje instantáneo en bornes sea idéntico al de la red. Por lo tanto se debe cumplir que máquina y red tengan igual secuencia de fases, frecuencia, voltaje eficaz y fase.

Instrumentos utilizados para la sincronización:

- **Sincronoscopios** (aguja actúa como motor de inducción)
- **Columnas de sincronización** (frecuencímetros, voltímetro y
- sincronoscopio)
- **Secuencimetro y Fasimetro**









Generador Síncrono

Conexión a una Barra Infinita

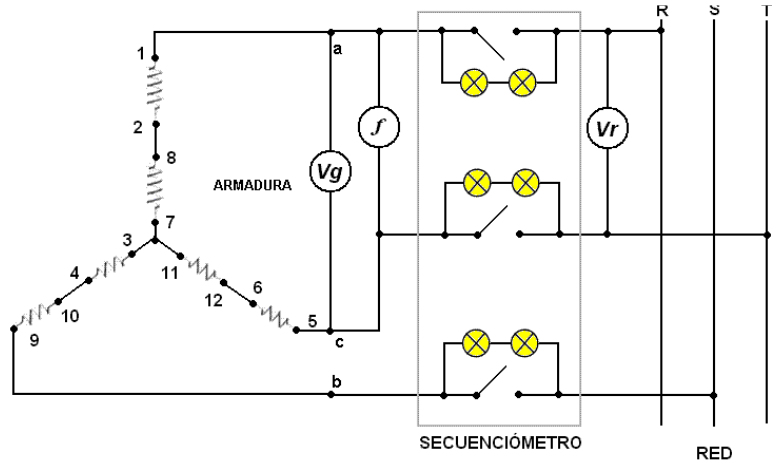
Relé de Sincronismo

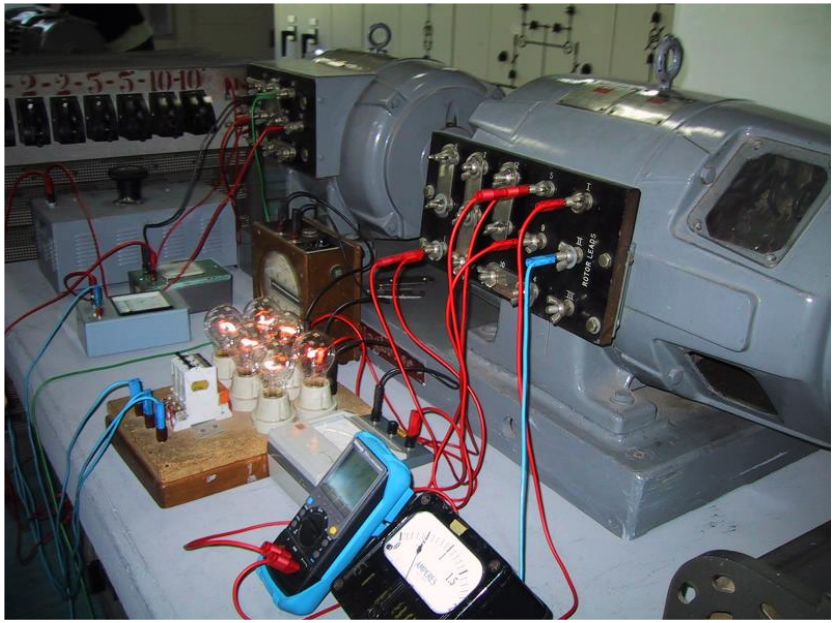


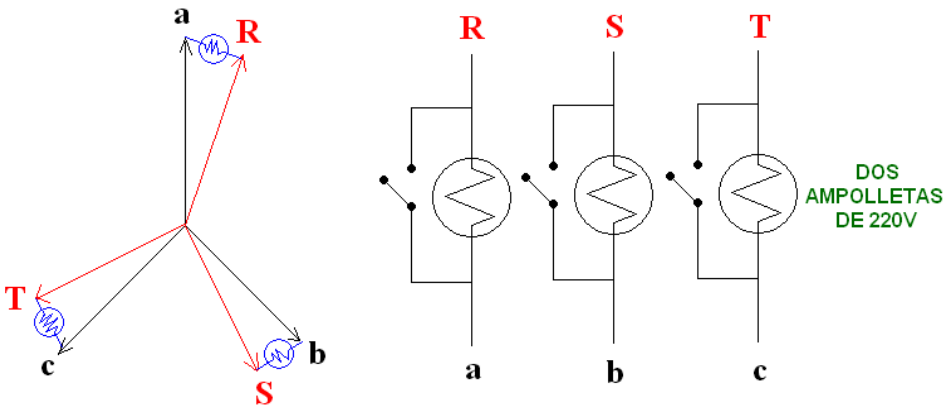
Generador Síncrono

Conexión a una Barra Infinita

Conexión de un generador síncrono: Otra forma más artesanal para lograr todas los requisitos de conexión es utilizar un voltímetro, y construir un sincronoscopio y secuencimetro con ampolletas.

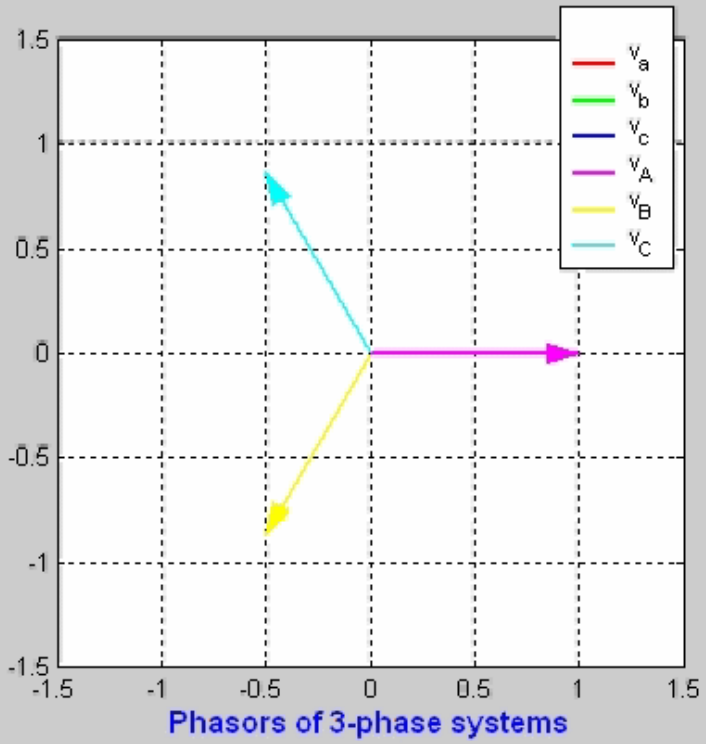


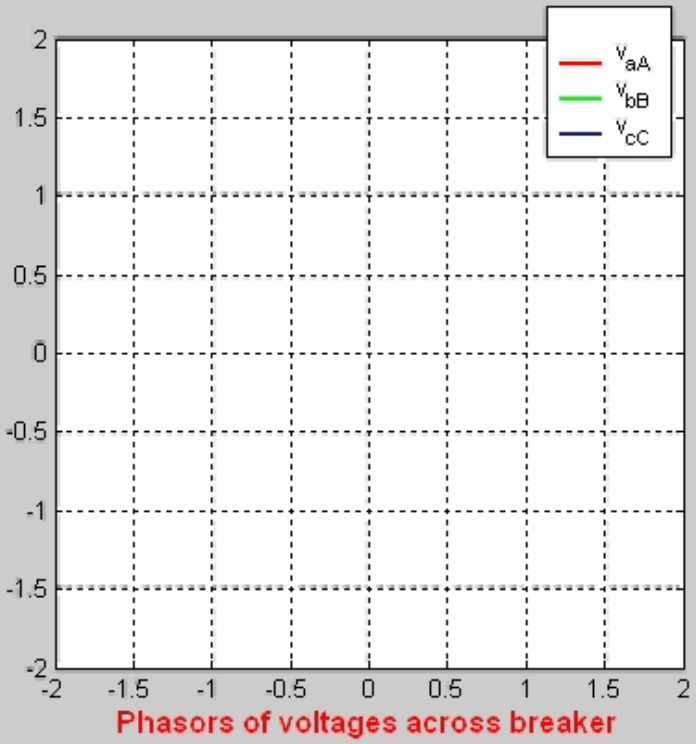




Generador Síncrono

Conexión a una Barra Infinita





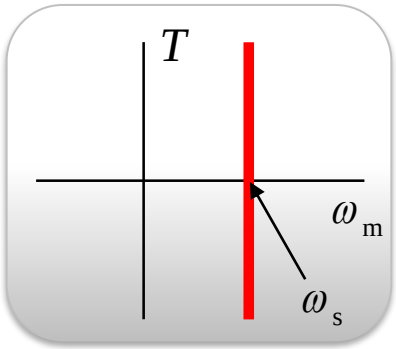
Motor Síncrono
Conexión a una Barra Infinita

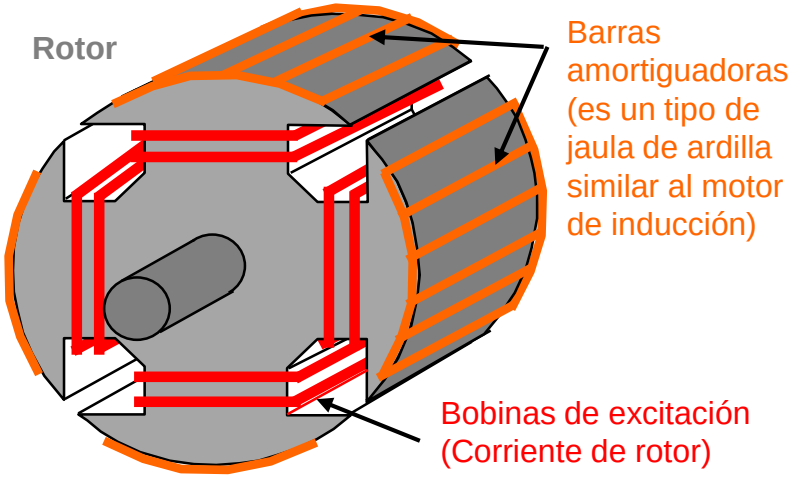
Conexión de un motor síncrono: Cuando los motores síncronos son utilizados mediante una conexión directa a la red (no hay un Motor Drive) tenemos:

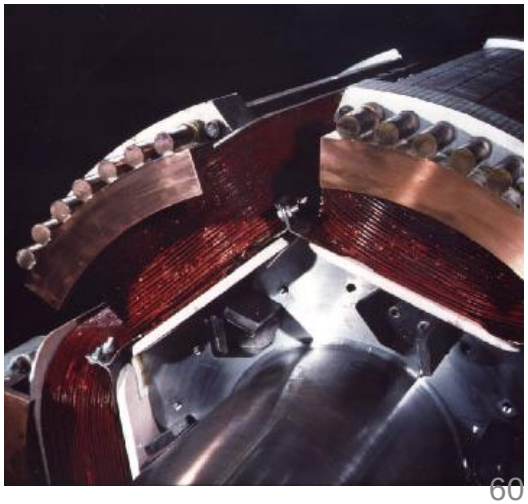
- Regulación de velocidad nula (velocidad siempre constante $\omega_m=\omega_s=\omega/p$)
- Control sobre el factor de potencia ($\cos\varphi$ se controla con E_g)
- Torque nulo al arranque (solo hay torque a velocidad síncrona $\omega_s=\omega_s=\omega/p$)

El problema del arranque se puede solucionar con las siguientes formas:

- Acoplamiento mecánico a un motor auxiliar (motor de partida)
- Rotor con barras amortiguadoras (rotor con jaula de ardilla)
- Motor Drive: la máquina puede operar a cualquier velocidad

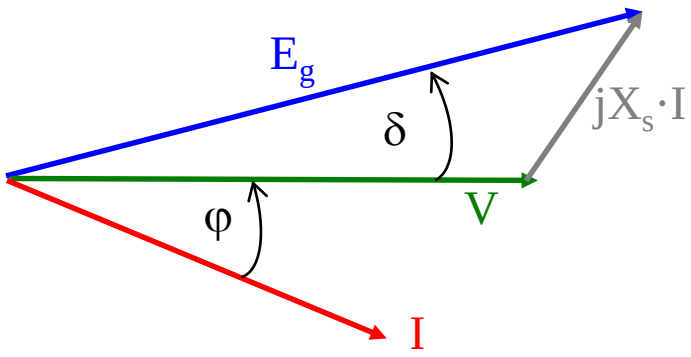






Máquina Síncrona
Diagrama PQ

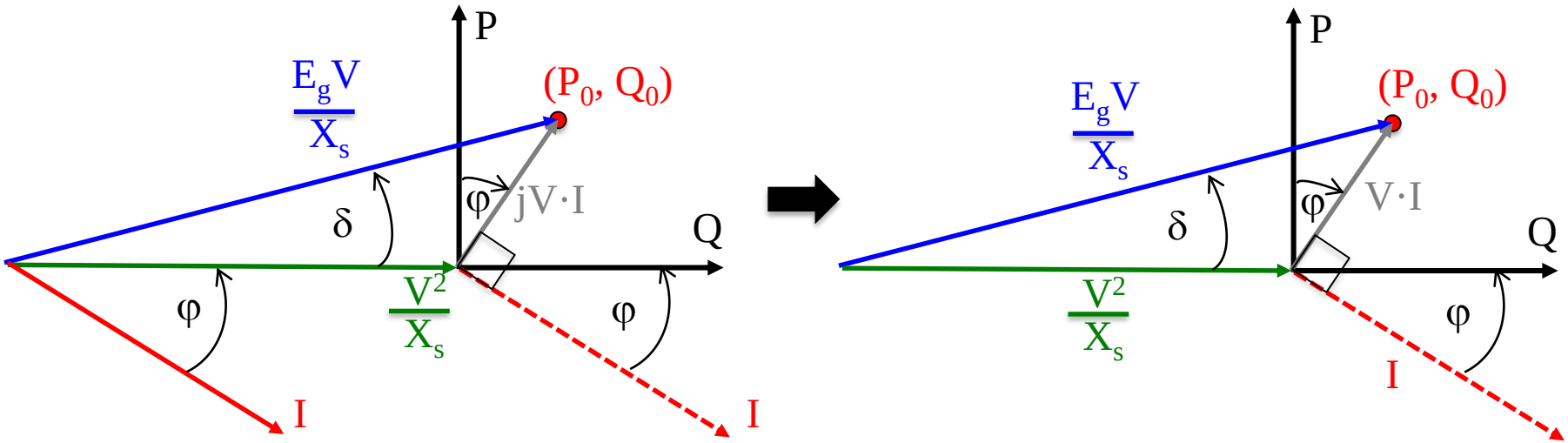
Los fasores de la máquina son:



$$P = \frac{E_g V}{X_s} \sin \delta$$

$$Q = \frac{E_g V}{X_s} \cos \delta - \frac{V^2}{X_s}$$

Para obtener la potencia **S=VI*** multiplicamos las magnitudes del triangulo por **V/X_s:**

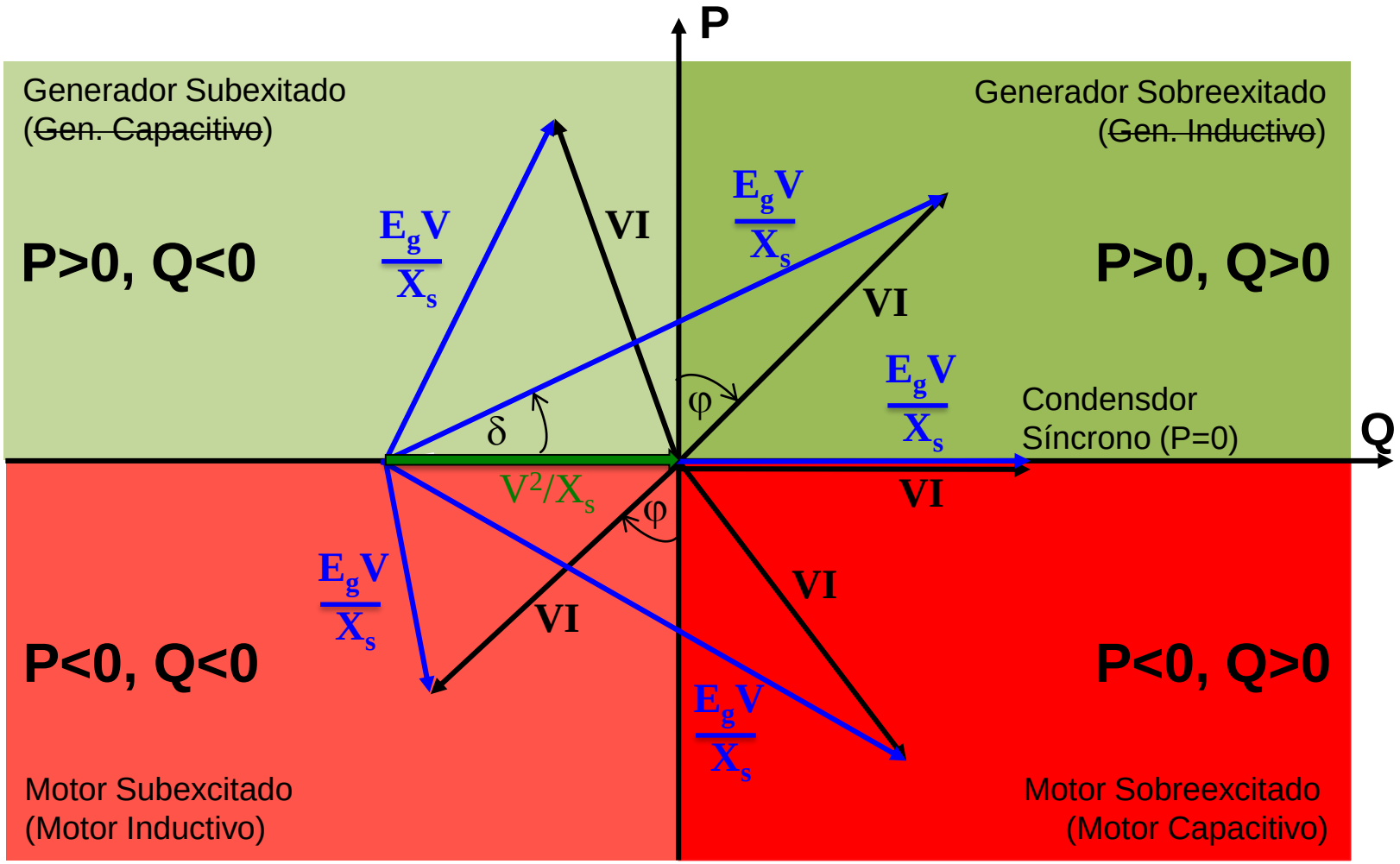


Máquina Síncrona

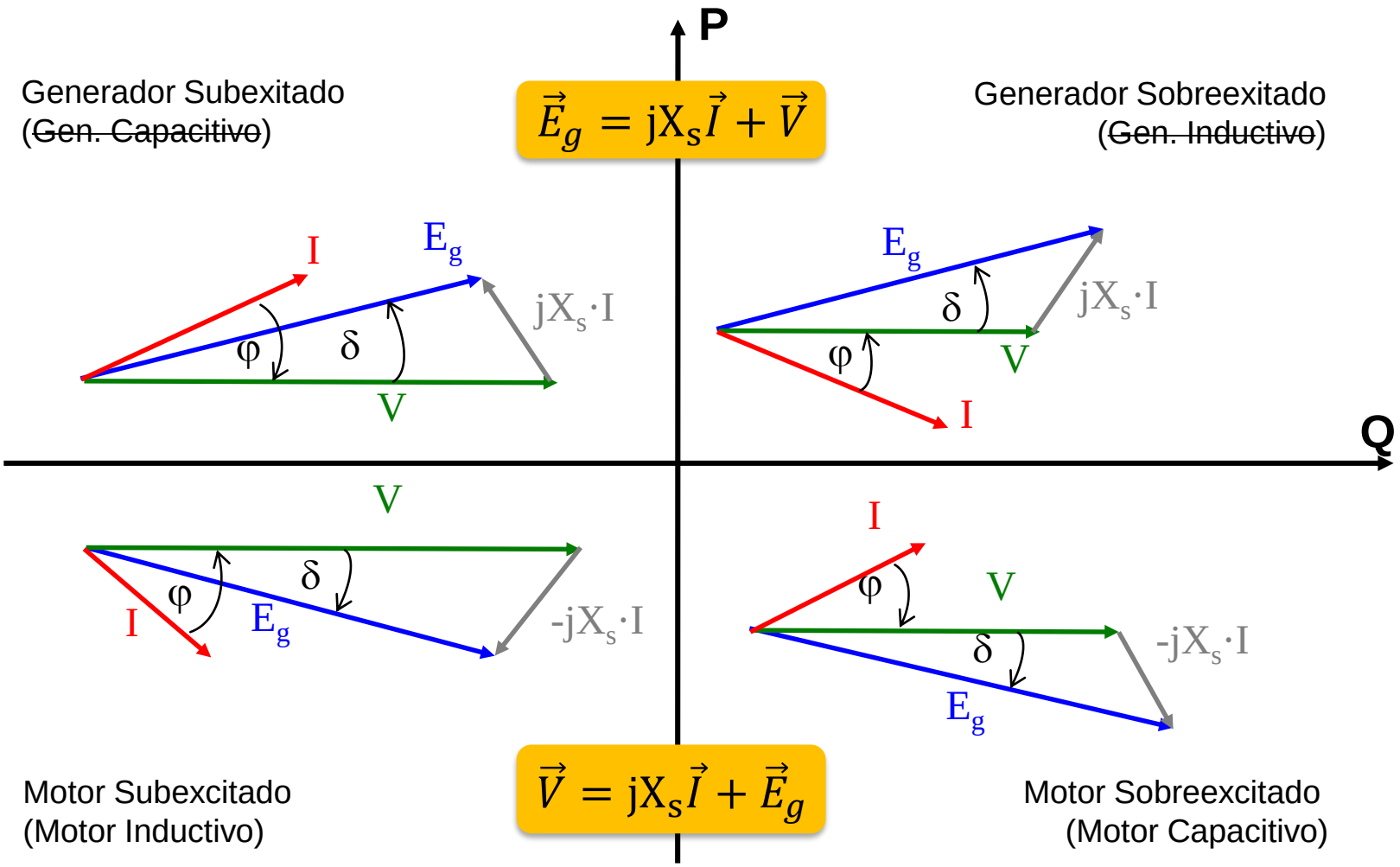
Diagrama PQ

$$P = \frac{E_g V}{X_s} \sin \delta$$

$$Q = \frac{E_g V}{X_s} \cos \delta - \frac{V^2}{X_s}$$

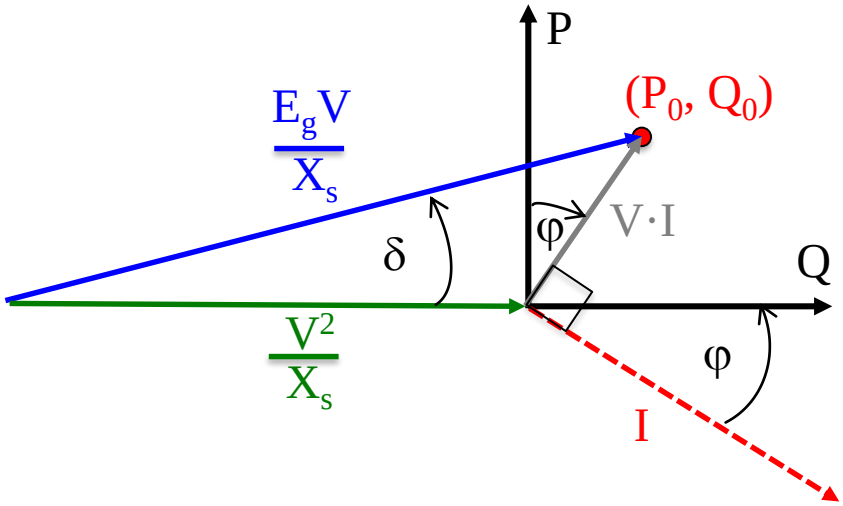


Máquina Síncrona
Diagrama PQ



Máquina Síncrona conectada a **Barra Infinita**
Diagrama PQ

Como la barra es infinita **V y ω son constantes** y sólo podemos manipular $\mathbf{E_g}$ y $\mathbf{P_{mec}}$.



$$P = \frac{E_g V}{X_s} \sin \delta$$

$$Q = \frac{E_g V}{X_s} \cos \delta - \frac{V^2}{X_s}$$

La potencia activa P y reactiva Q deben ser controladas para satisfacer algún objetivo.

- **P** se controla directamente con el torque mecánico aplicado ($\mathbf{P_{mec}}$).
- **Q** se controla directamente con $\mathbf{E_g}$ mediante la corriente de excitación (rotórica).

$$e_g(t) = I_r L_{max}^{er} \cdot \omega \cdot \sin \omega t$$

A continuación se estudian dos posibles operaciones a modo de ejemplo:

Máquina Síncrona conectada a **Barra Infinita**
Diagrama PQ

Caso I: E_g variable y P constante

① Controlamos **E_g** modificando la corriente de excitación **I_r**.

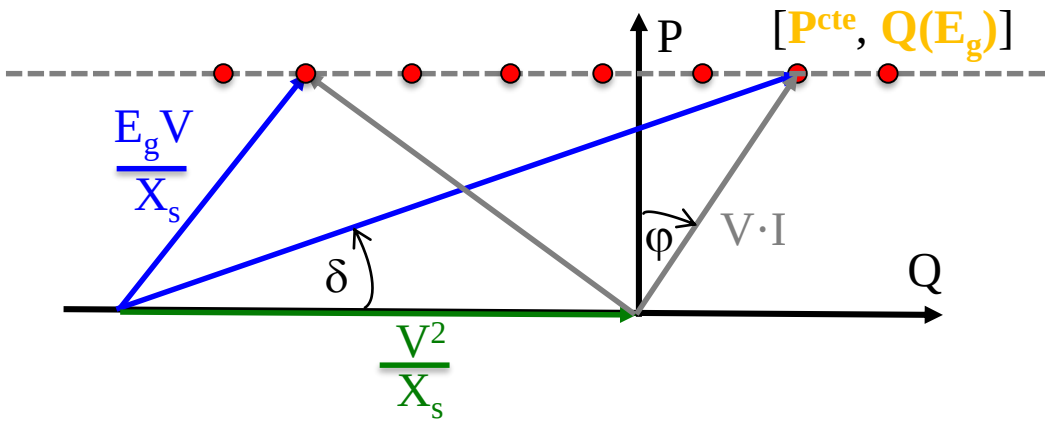
② Como **P**, **V** y **X_s** son constantes, la modificación de **E_g** genera un cambio en el ángulo de carga **δ**.

③ El ángulo de carga **δ** genera un cambio en el ángulo **φ**.

④ El factor de potencia se modifica (**f.p = cosφ**) y **Q** es controlado.

NOTA 1: Hay limites de operación, ya que E_g no puede disminuir de determinado valor para que no se pierda el sincronismo, y no puede exceder valores nominales.

NOTA 2: Cuando Q=0 se obtiene la corriente de menor magnitud.



$$P = \frac{E_g V}{X_s} \sin\delta$$

$$Q = \frac{E_g V}{X_s} \cos\delta - \frac{V^2}{X_s}$$

Máquina Síncrona conectada a Barra Infinita
Diagrama PQ

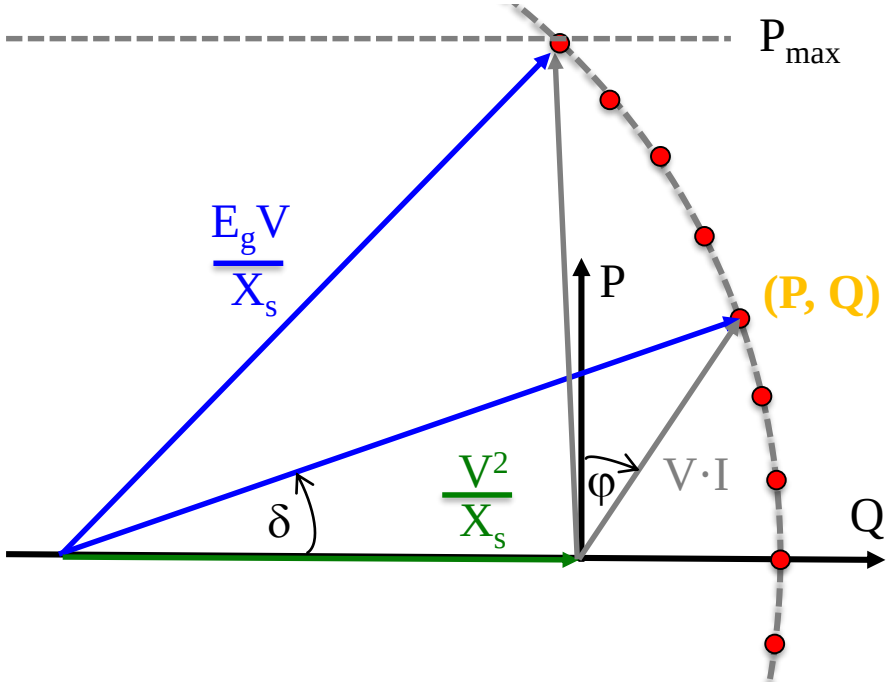
Caso II: E_g constante y P variable

① Controlamos **P** modificando el torque aplicado al generador **T (P/ω_s)**

② Como **E_g**, **V** y **X_s** son constantes, la modificación de **P** genera un cambio en el ángulo de carga **δ**. El ángulo de carga **δ** genera un cambio en el ángulo **φ**.

③ El factor de potencia se modifica (**f.p = cosφ**) y **Q** es modificado sin control.

NOTA 1: Si se opera con **δ** pequeño **Q** se puede considerar constante ante cambios en **P**.



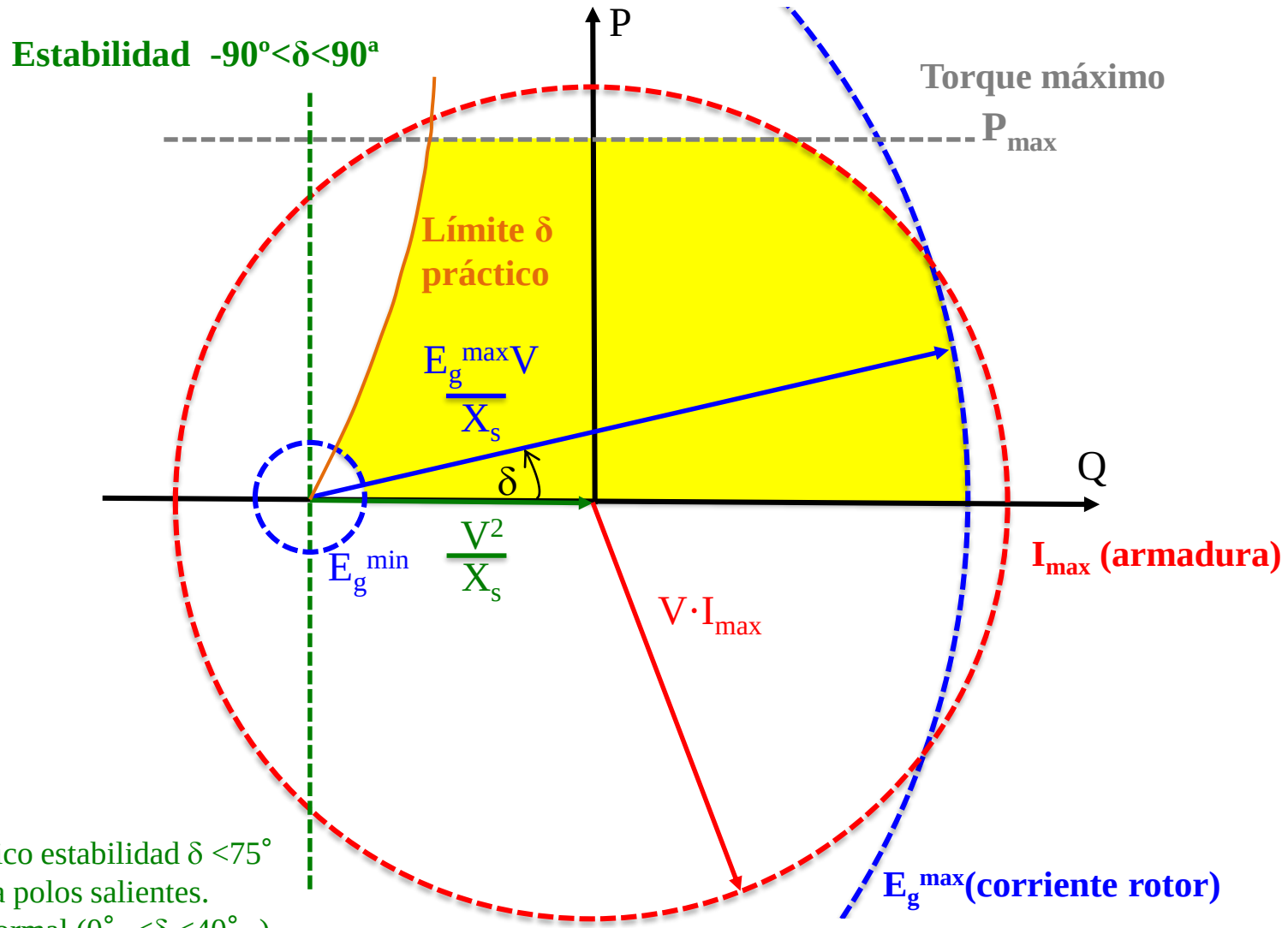
$$P = \frac{E_g V}{X_s}\sin\delta \quad \Rightarrow \quad P = K\sin\delta$$

$$Q = \frac{E_g V}{X_s}\cos\delta - \frac{V^2}{X_s} \quad \Rightarrow \quad Q \approx \frac{E_g V}{X_s} - \frac{V^2}{X_s}$$

$\delta \approx 0 \Leftrightarrow \cos\delta \approx 1$ $\qquad$ $Q \approx Cte$

Máquina Síncrona conectada a **Barra Infinita**

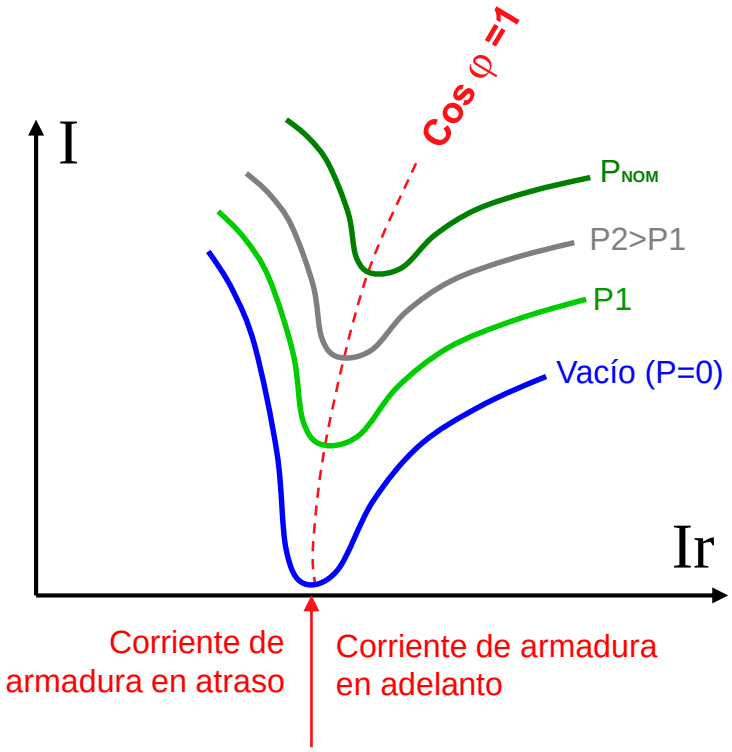
Diagrama de operación PQ



- Limite práctico estabilidad δ <75˚ y menor para polos salientes.
- Operación normal (0˚ <δ <40˚)

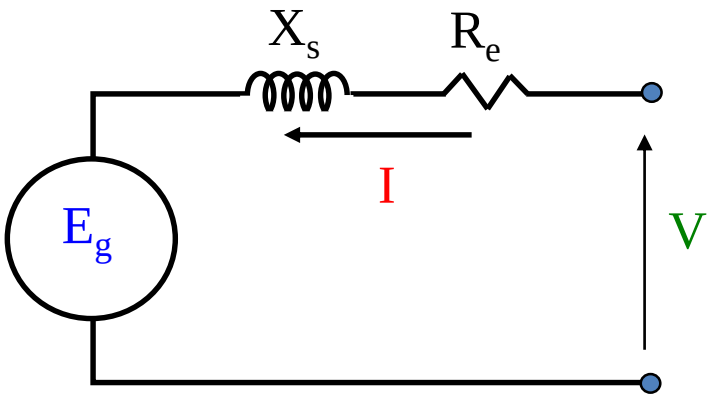
Máquina Síncrona (Motor)
Curvas en “V” de Mordey

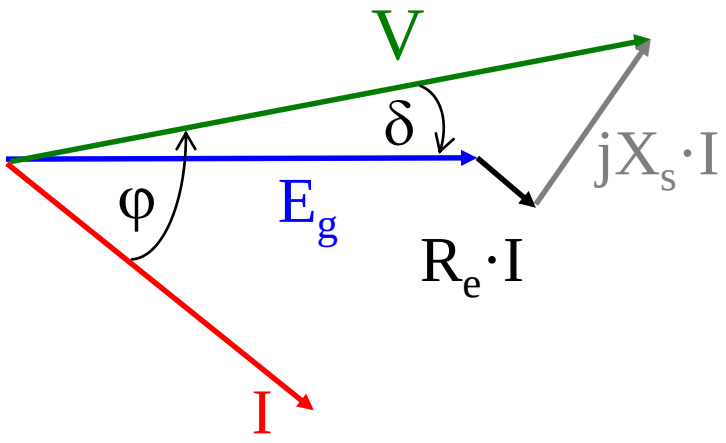
Caso Motor



Mínima corriente de armadura para una potencia entregada “P” (Q=0)

$$\vec{V} = R_e\vec{I} + jX_s\vec{I} + \vec{E}_g$$

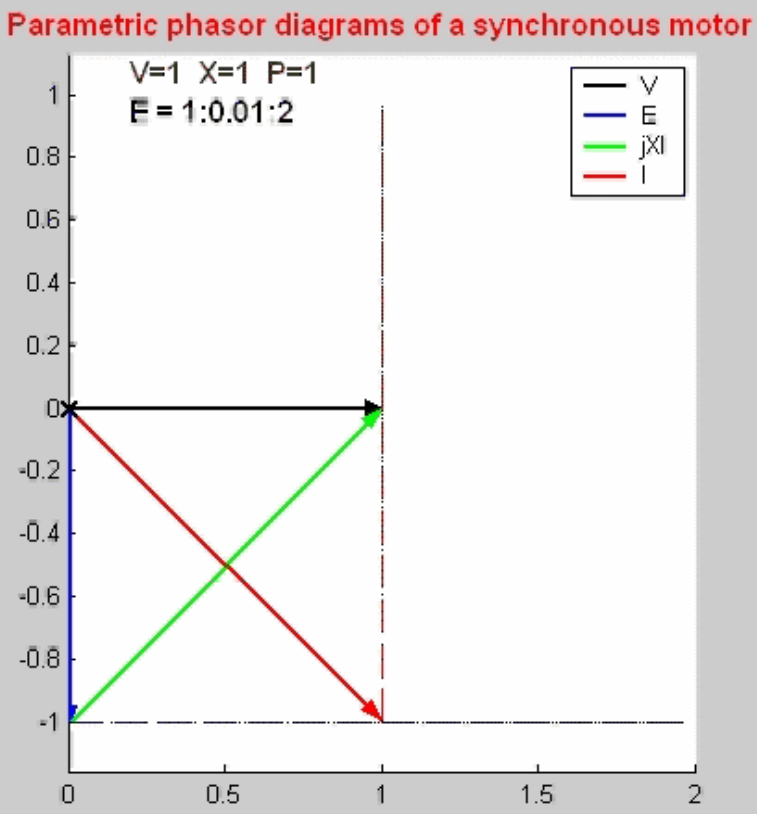


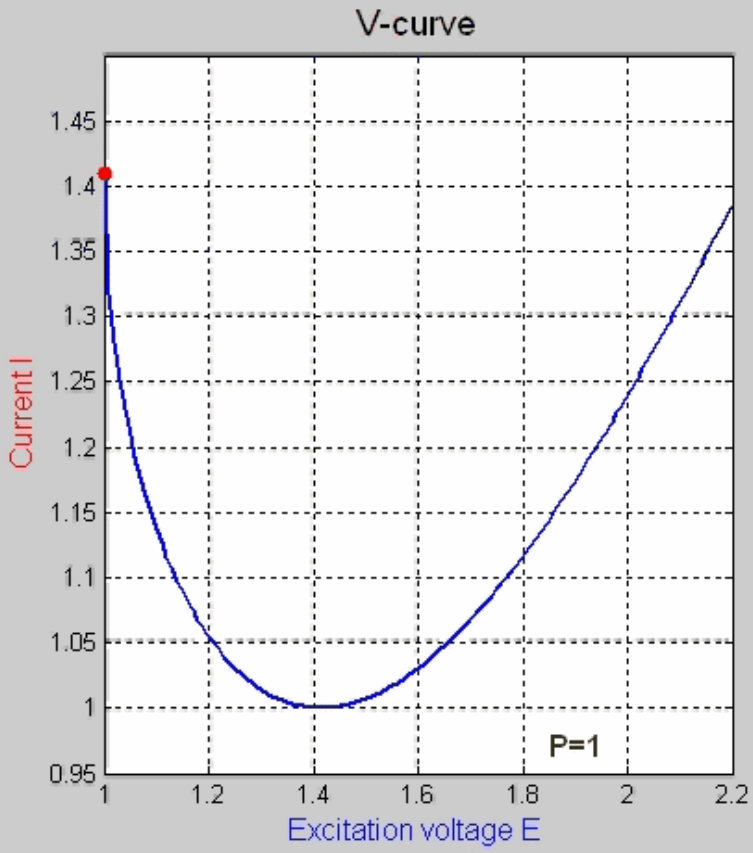


Máquina Síncrona (Motor)

Curvas en “V” de Mordey

Caso Motor

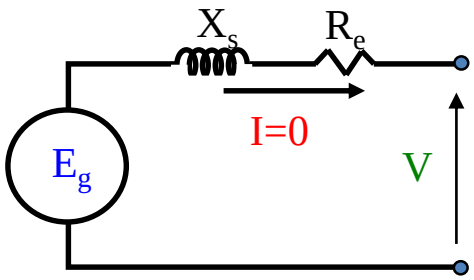




Máquina Síncrona

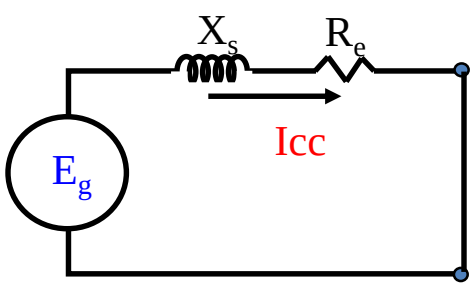
Pruebas en c.a y c.c (Z_s ➔ X_s)

Vacío (c.a)



$$V = E_g = V_{nom}$$

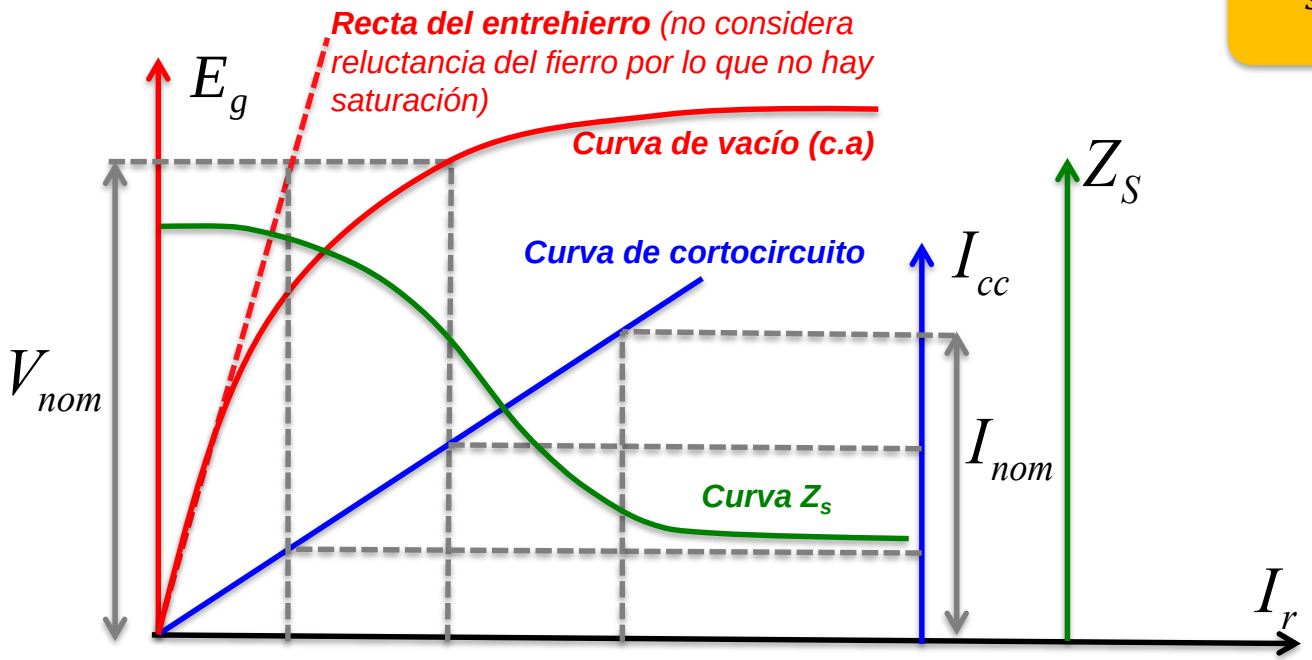
Cortocircuito (c.c)



$$Z_s = \frac{E_g}{I_{cc}}$$

$$R_e \approx 0$$

$$X_s = \frac{E_g}{I_{cc}}$$



Máquina Síncrona

Prueba de deslizamiento (X_d y X_q)

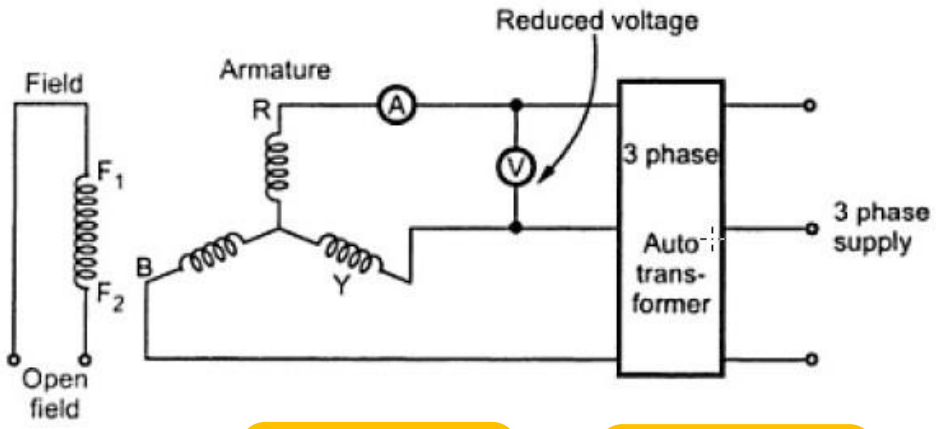
Para obtener las reactancias realizamos la siguiente prueba:

① Operamos sin campo de excitación abriendo el circuito del rotor ($I_r=I_e=0$). Como no hay excitación tenemos que $E_g=0$.

② Alimentamos el estator con un voltaje reducido porque $E_g=0$ y la corriente de armadura no debe superar su valor nominal.

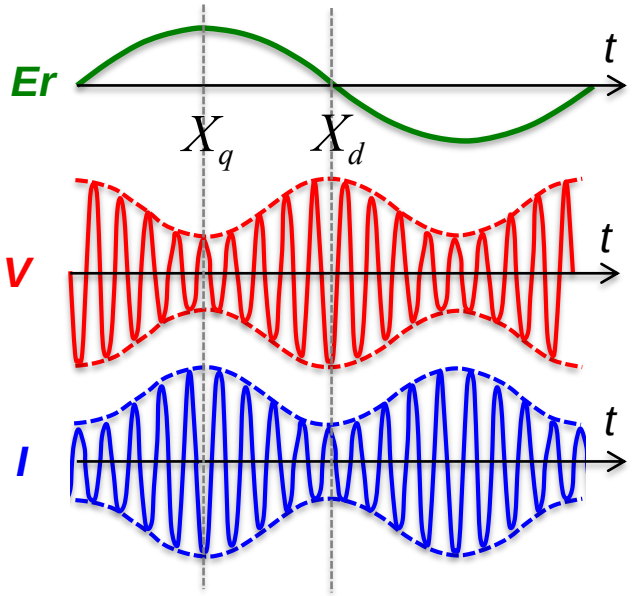
③ Ajustamos el torque aplicado a la máquina para que la velocidad sea cercana pero distinta a la síncrona $\omega_m \neq \omega_s$ (generamos un deslizamiento).

④ Medimos el voltaje y la corriente de una fase y calculamos sus máximos y mínimos.



$$X_q = \frac{V_{min}}{I_{max}}$$

$$X_d = \frac{V_{max}}{I_{min}}$$



Fin Lectura 6



Conclusiones

Lectura 6: Máquina Síncrona

Características y clasificación

La MS se puede clasifica en rotor cilíndrico y polos salientes. Su velocidad gira en sincronía con el CMR y la frecuencia de alimentación. Es la máquina más utilizada para generación por su alto control en el f.p.

Operación

Como motor tiene la característica de trabajar a velocidad constante y no tiene torque de partida, lo que tiene diversas soluciones. Como generador en una red aislada debe ser muy controlado porque impone el voltaje y la frecuencia. Como generador en una barra infinita debe controlar simplemente el P y Q entregado mediante el torque mecánico y Eg respectivamente.

Diagrama PQ de operación

Permite un análisis ilustrativo en los 4 cuadrantes de operación.

Pruebas para estimación de parámetros

Los parámetros de la máquina se pueden obtener mediante pruebas de c.a. c.c. y deslizamiento.

Próxima Lectura

Lectura 7
Máquina de Inducción

