



UNIVERSIDADE
DE VIGO

MÁQUINAS SÍNCRONAS

Manuel Pérez Donsión

Departamento de Ingeniería Eléctrica

Universidad de Vigo

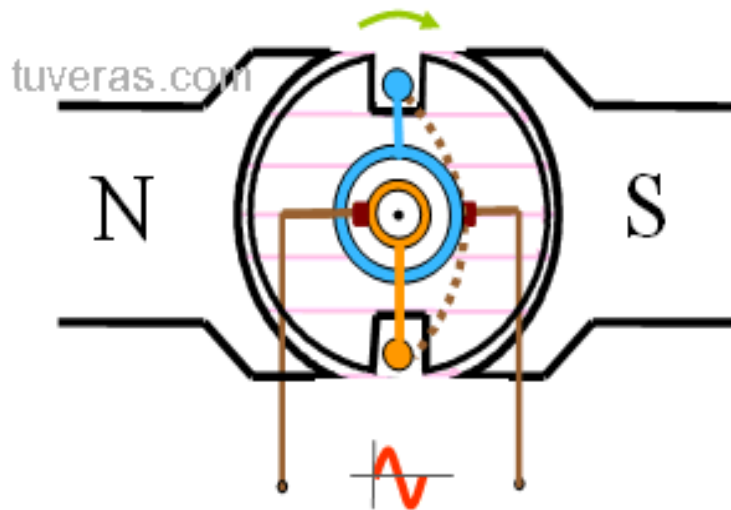
El Alternador Elemental

Una espira girando a una velocidad angular ω en el interior de un campo magnético uniforme, como el de la figura, genera una fem de valor:

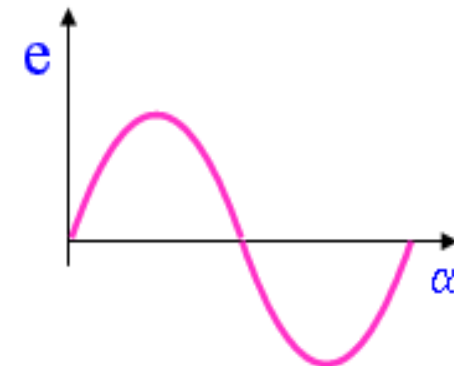
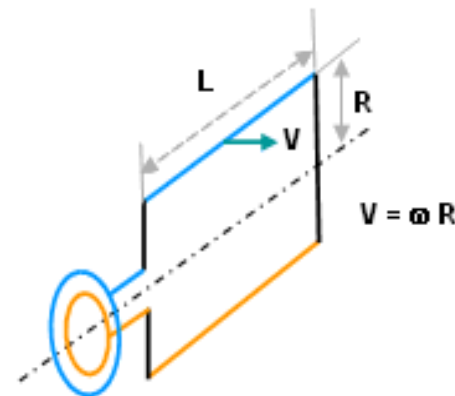
$$e(\alpha) = E_M \text{ sen } \alpha = E_M \text{ sen } \omega t$$

teniendo como valor máximo

$$E_M = B L V = B L \omega R$$



$$e(\alpha) = E_M \text{ sen } \alpha = E_M \text{ sen } \omega t$$

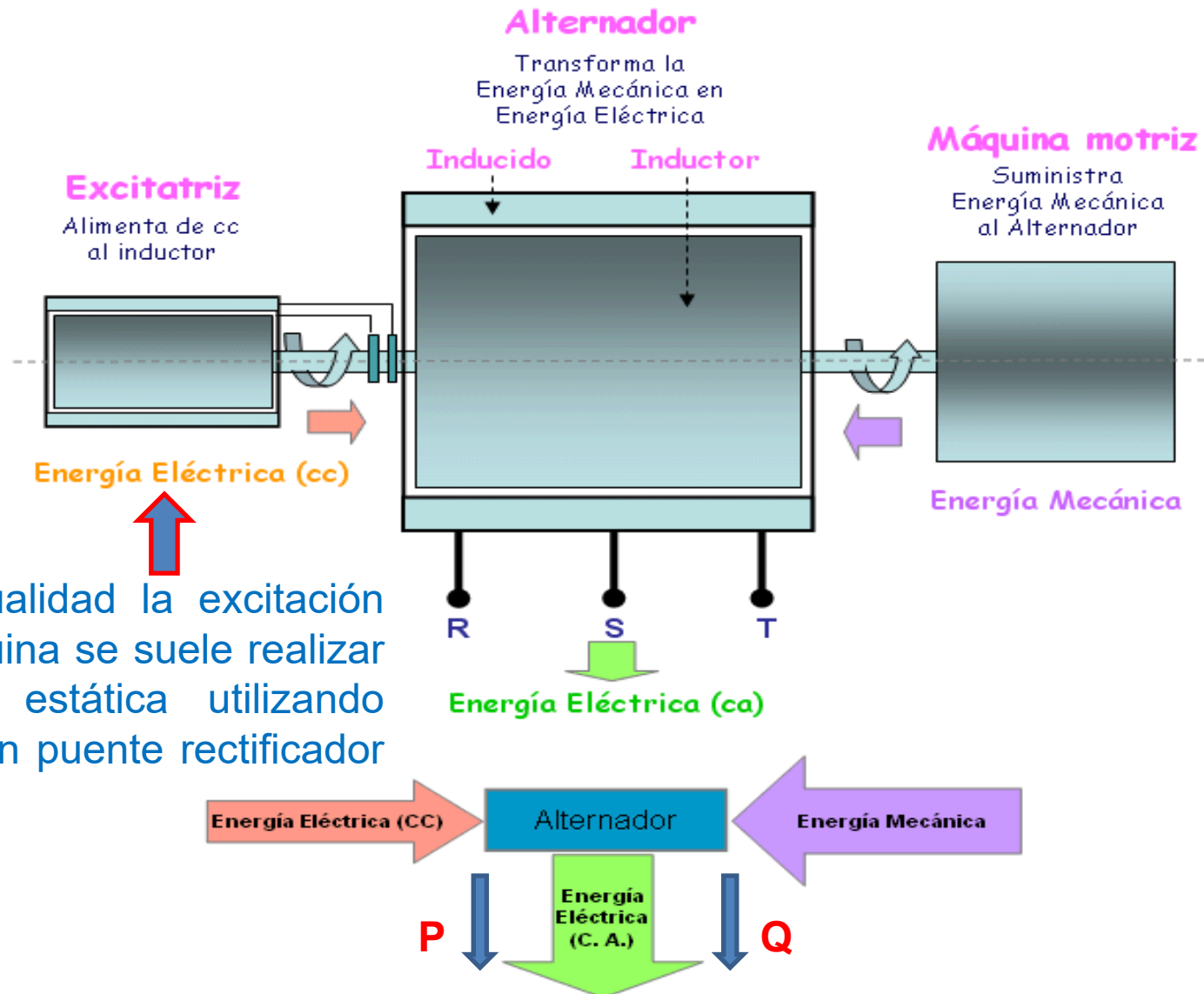


Recordar que la velocidad de rotación de las máquinas síncronas n_r (r.p.m) está rígidamente vinculada con la frecuencia f_1 de la red de ca con la cual trabajan, de acuerdo con la expresión:

$$n_r = n_s = \frac{60 \cdot f_1}{p}$$

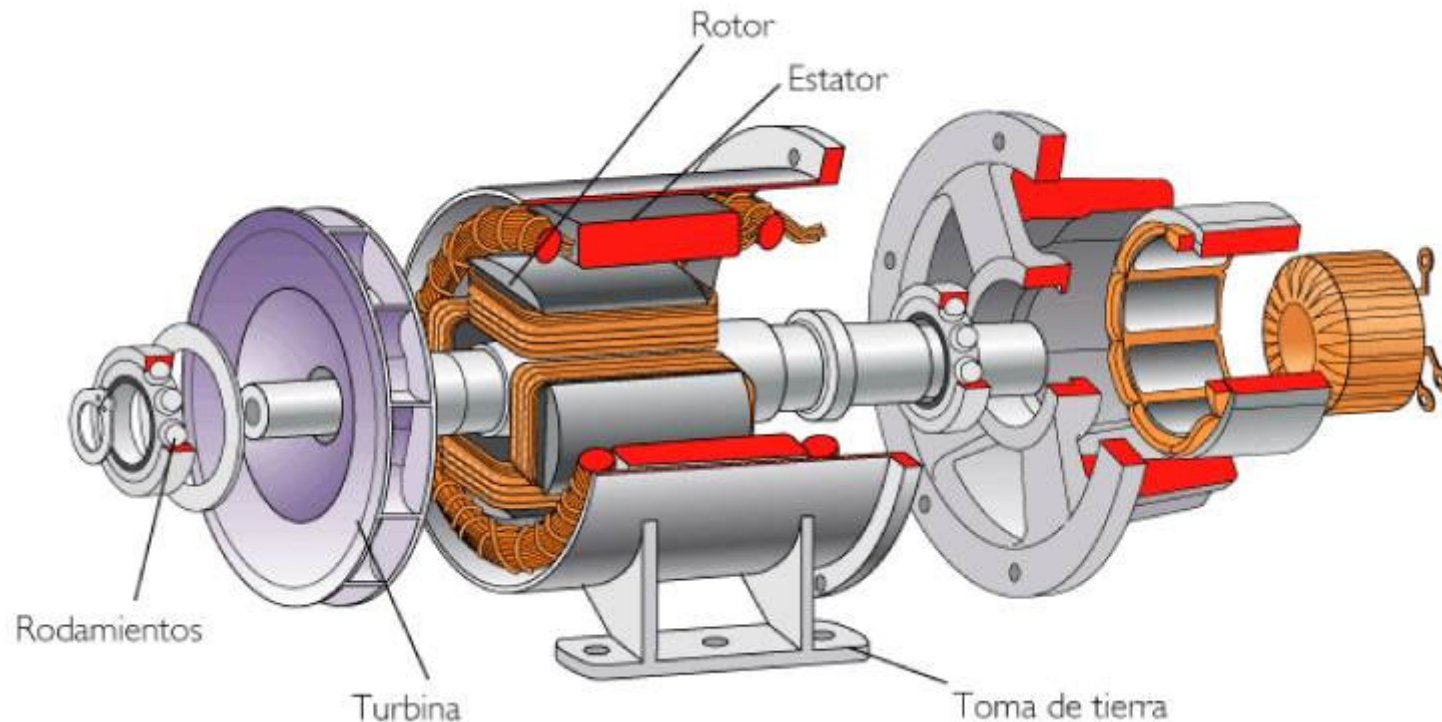
p =número de polos de la máquina

El Alternador



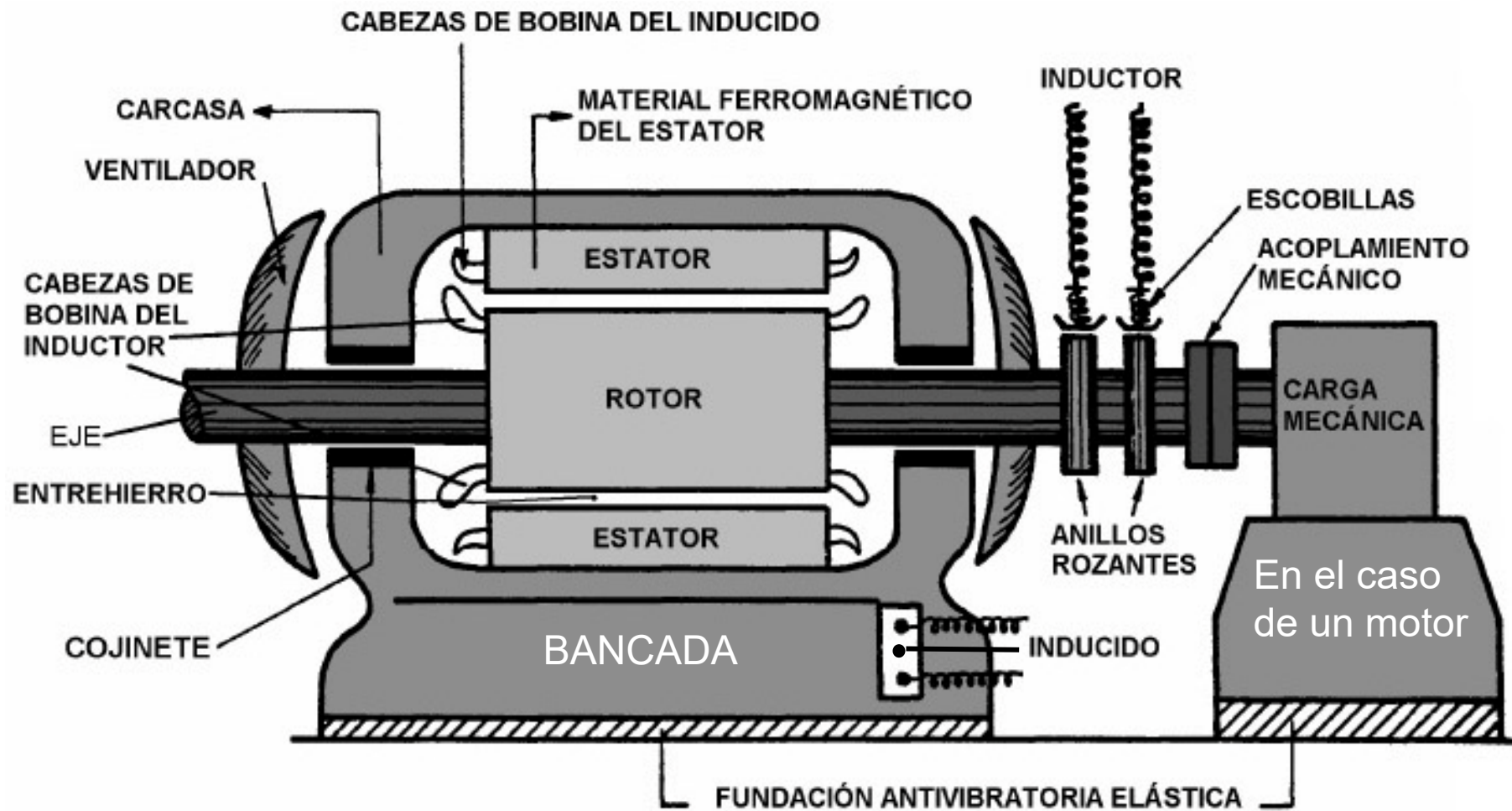
En la actualidad la excitación de la máquina se suele realizar de forma estática utilizando para ello un puente rectificador controlado.

Constitución de la máquina síncrona



La máquina síncrona consta de un **estator** fijo, en el cual se coloca normalmente el devanado inducido (grandes máquinas), por el que circula corriente alterna, y un **rotor** que gira a la velocidad síncrona y en el cual, generalmente (grandes máquinas), se coloca el devanado inductor o devanado que produce el campo magnético. El devanado inductor se excita por corriente continua.

Constitución de la máquina síncrona



Constitución de una máquina síncrona

(Fuente: "El fenómeno electromagnético" de José Antonio de Gurrutxaga Ruiz)

Constitución de la máquina síncrona



Rotor de polos salientes



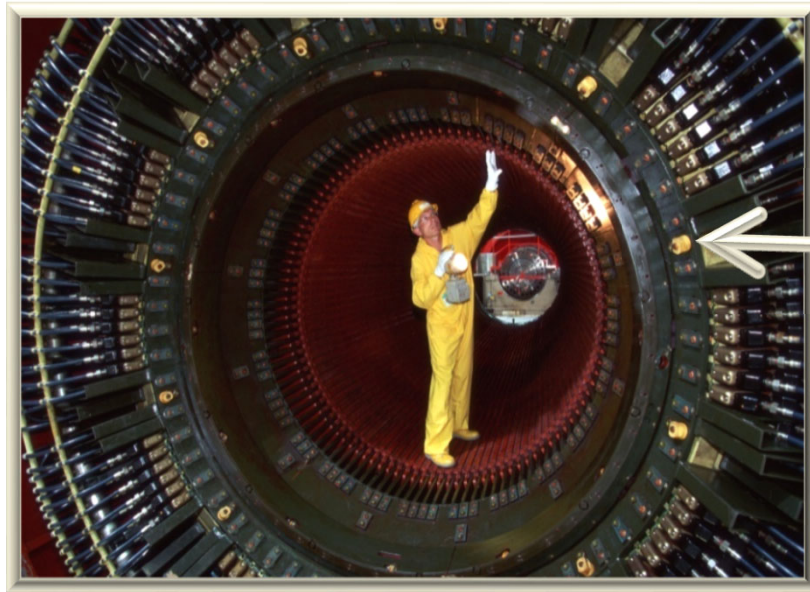
Rotor cilíndrico (liso) que normalmente se emplean en centrales térmicas. Se trata de máquinas de velocidad elevada (1500-3000rpm), por lo que se denominan turboalternadores. Se trata de máquinas de 2 o 4 polos.

Estator

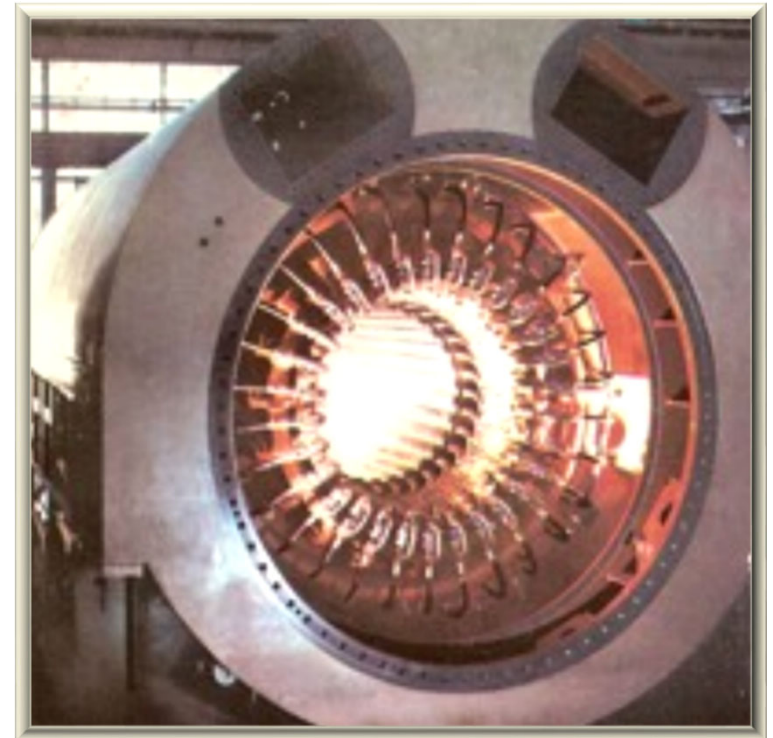
Estator y rotor de polos salientes que normalmente se emplean en centrales hidráulicas. Son máquinas de un número de polos elevado y, por ello, son lentas. Se denominan alternadores síncronos

20/10/2021

Constitución de la máquina síncrona



Estator



Estator:

El estator, o parte estática, de una máquina síncrona es similar al de una máquina asíncrona y en las grandes máquinas contiene un devanado trifásico de corriente alterna denominado devanado inducido, que se conecta en estrella para tener un neutro real y un circuito magnético formado por apilamiento de chapas magnéticas.

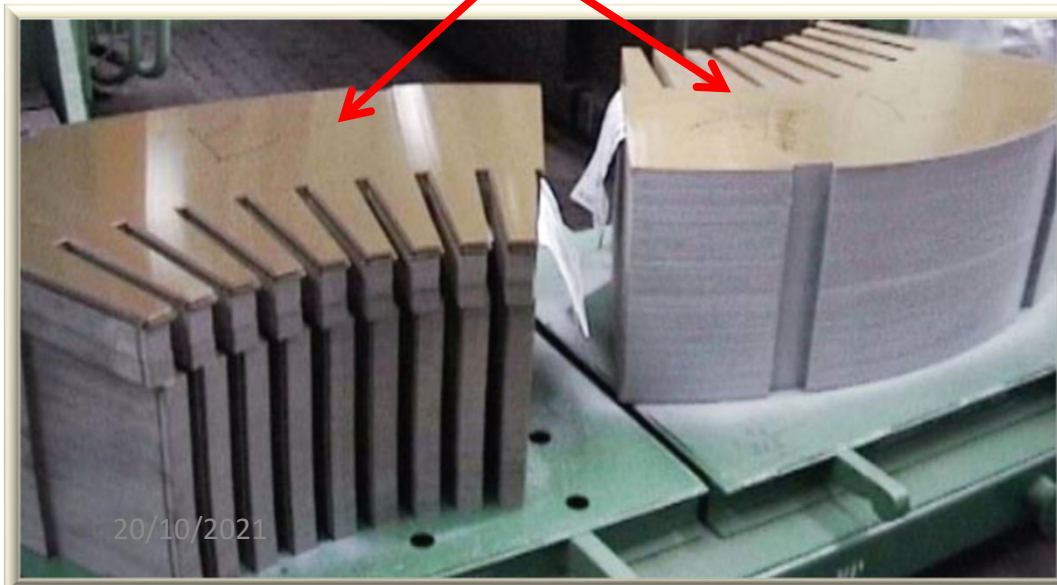
Devanado inducido



Cabezas de bobina

Bobinas

Chapas magnéticas



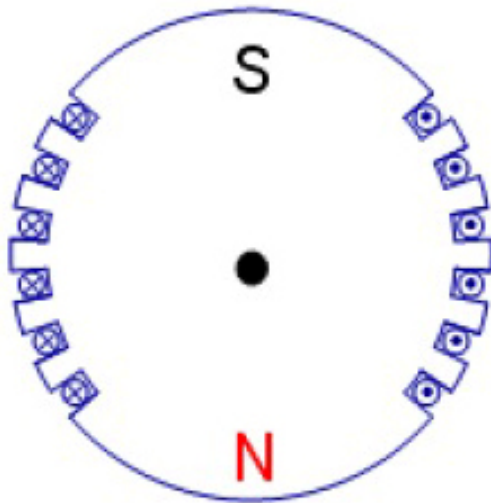
En las máquinas síncronas grandes, que pueden llegar a una potencia de 1.000-1.500 MVA en los alternadores, se coloca el **devanado inductor en el rotor y el devanado inducido en el estator**. En máquinas pequeñas (<10 VA) se hace a la inversa.

El **devanado inducido** se distribuye uniformemente en las ranuras del paquete de chapas magnéticas que conforman el circuito magnético del estator.

TIPOS DE INDUCTORES

Rotor de Polos Lisos

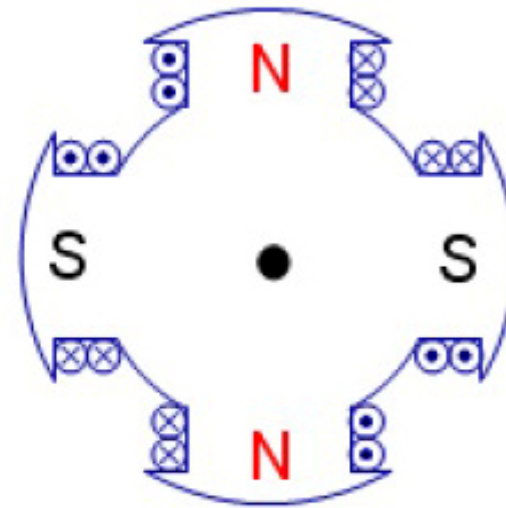
- Elevadas velocidades de giro (2 – 4 polos)
- Se usa con turbinas de gas y de vapor



Rotor de
polos lisos
 $p = 1$

Rotor de Polos Salientes

- Bajas velocidades de giro (+ de 4 polos)
- Se usa con turbinas hidráulicas

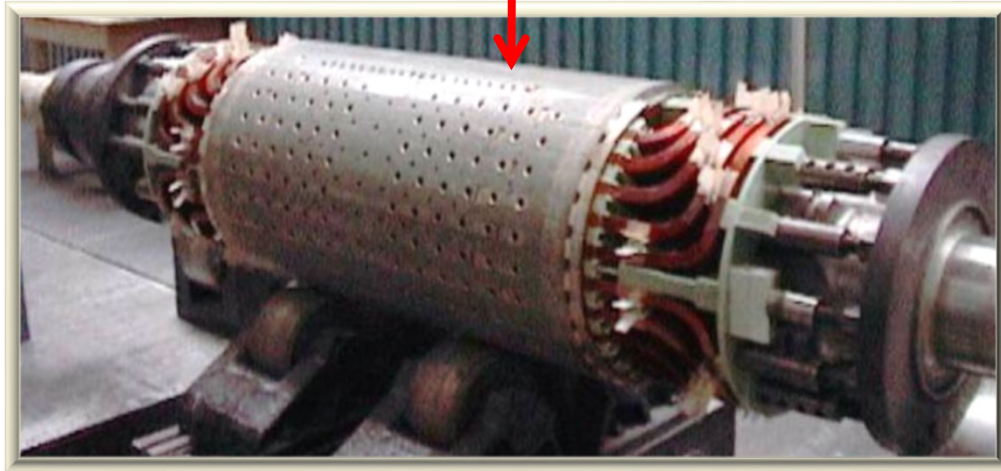


Rotor de polos
salientes
 $p = 2$

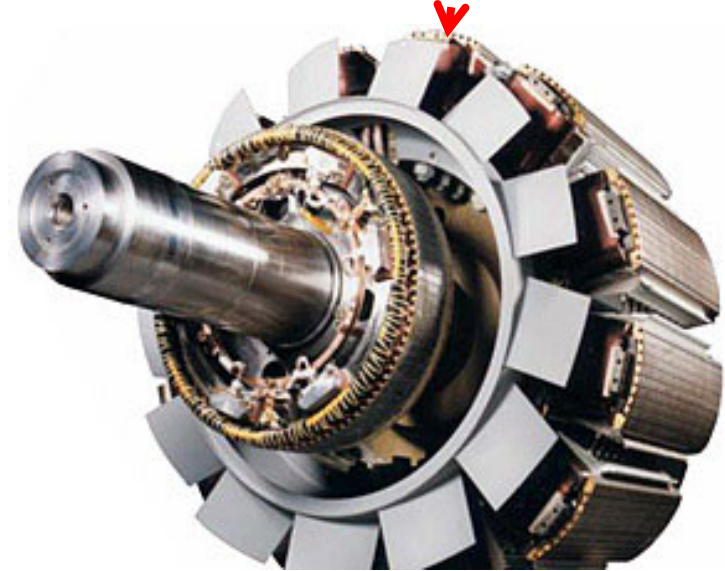
Constitución de la máquina síncrona

Tipos de inductores

Rotor de polos lisos



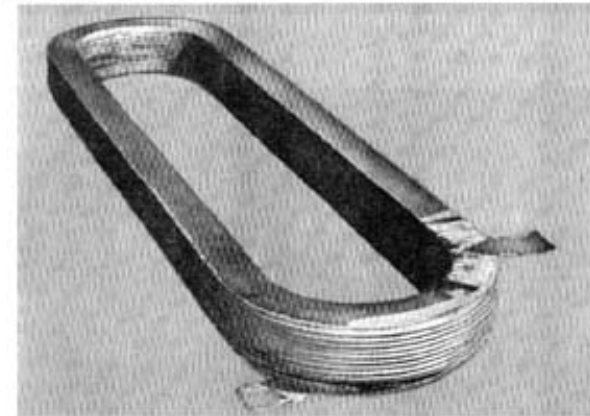
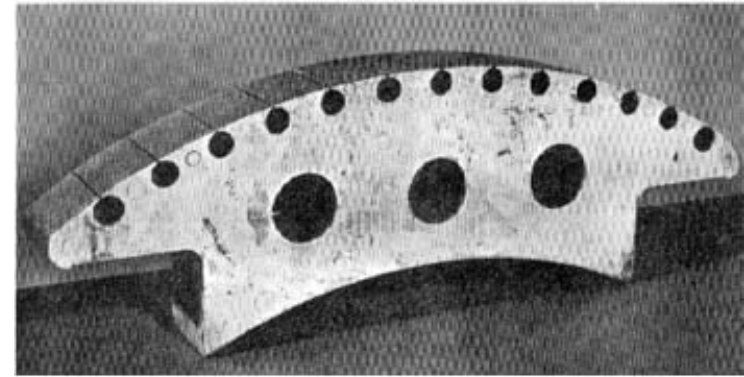
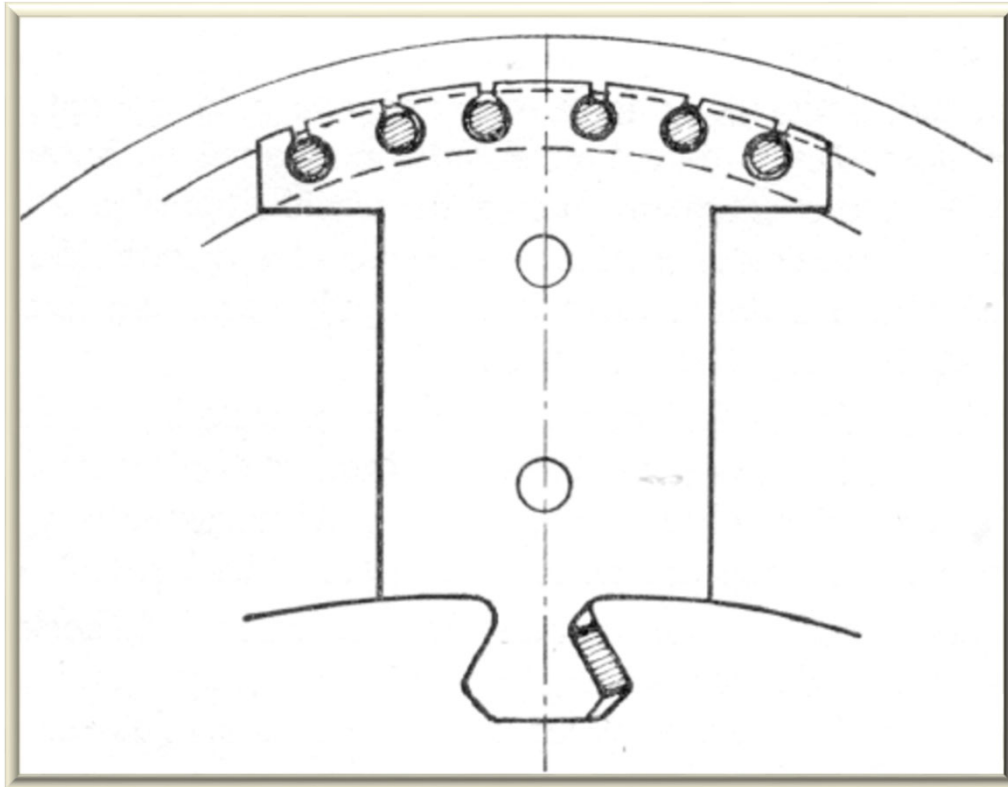
Rotor de polos salientes



Rotor:

El **rotor**, o parte rotativa, de una máquina síncrona es bastante diferente al de una máquina asíncrona. Contiene un devanado de corriente continua denominado **devanado inductor** (o de campo) y, en las máquinas de polos salientes, un devanado en cortocircuito, que impide el funcionamiento de la máquina a una velocidad distinta a la de sincronismo, denominado **devanado amortiguador**. Además, contiene un circuito magnético formado por apilamiento de chapas magnéticas de menor espesor que las del estátor.

Devanado amortiguador



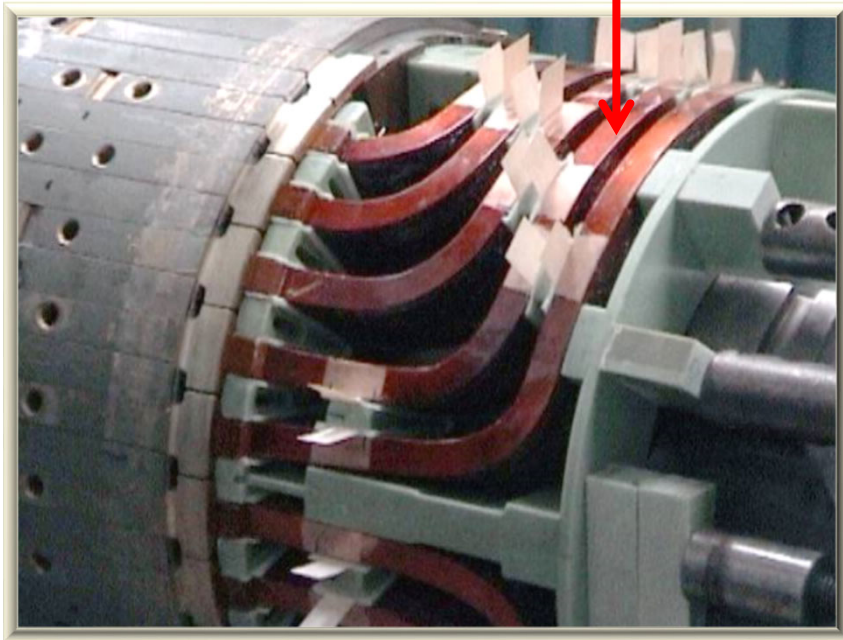
1°. Tiende a oponerse a todo campo excitado por el inducido que no gire en sincronismo con el inductor

2°. Se opone a toda acción que pueda alterar el sincronismo entre la velocidad del rotor y la velocidad del campo

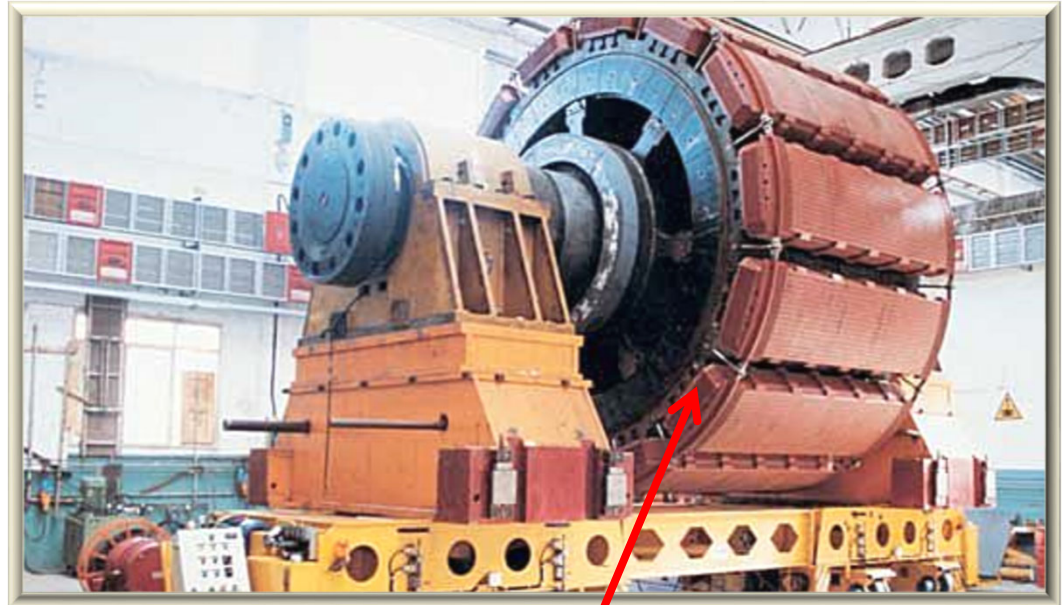
3°. Se opone a toda variación brusca de amplitud del campo principal del inducido en los regímenes transitorios

Devanado inductor

Detalle de la colocación de las cabezas de bobina



Devanado inductor de un rotor liso



Devanado inductor de un rotor de polos salientes

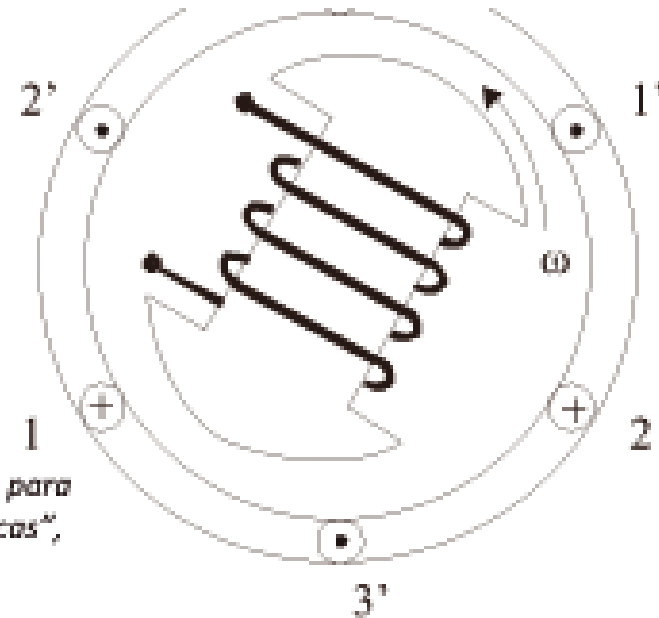
El **devanado inductor** construido en forma de arrollamiento concentrado en el caso de rotores de polos salientes o bien distribuido en ranuras en el caso de máquinas de rotor liso, alimentado por corriente continua, que da lugar a los polos de la máquina.

Excitación estática



$$n = \frac{60 \cdot f}{p}$$

Fuente: "Fundamentos de Electrotecnia para Ingenieros: Máquinas Eléctricas",
Marcombo

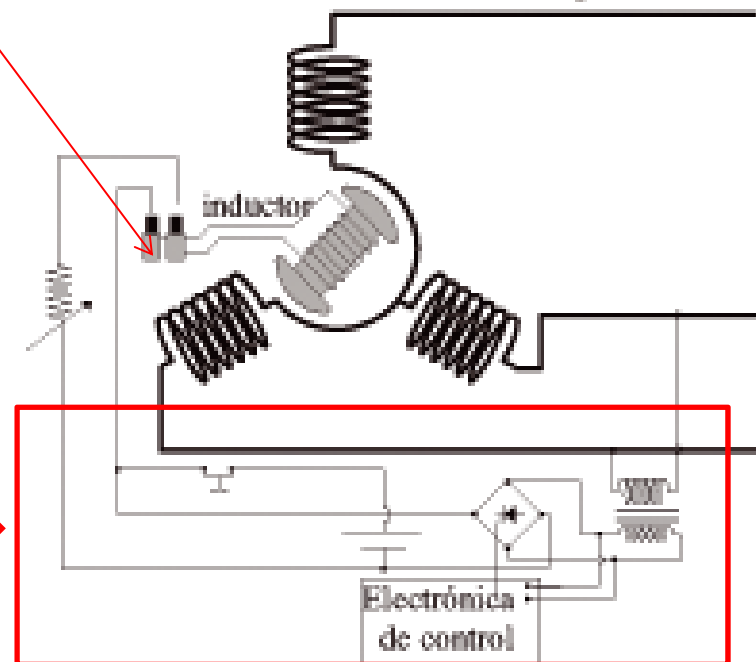
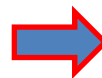


Las máquinas síncronas, como cualquier otro convertidor electromecánico de energía, están sometidas al principio de reciprocidad electromagnética, pudiendo funcionar tanto en el régimen de motor como de generador.

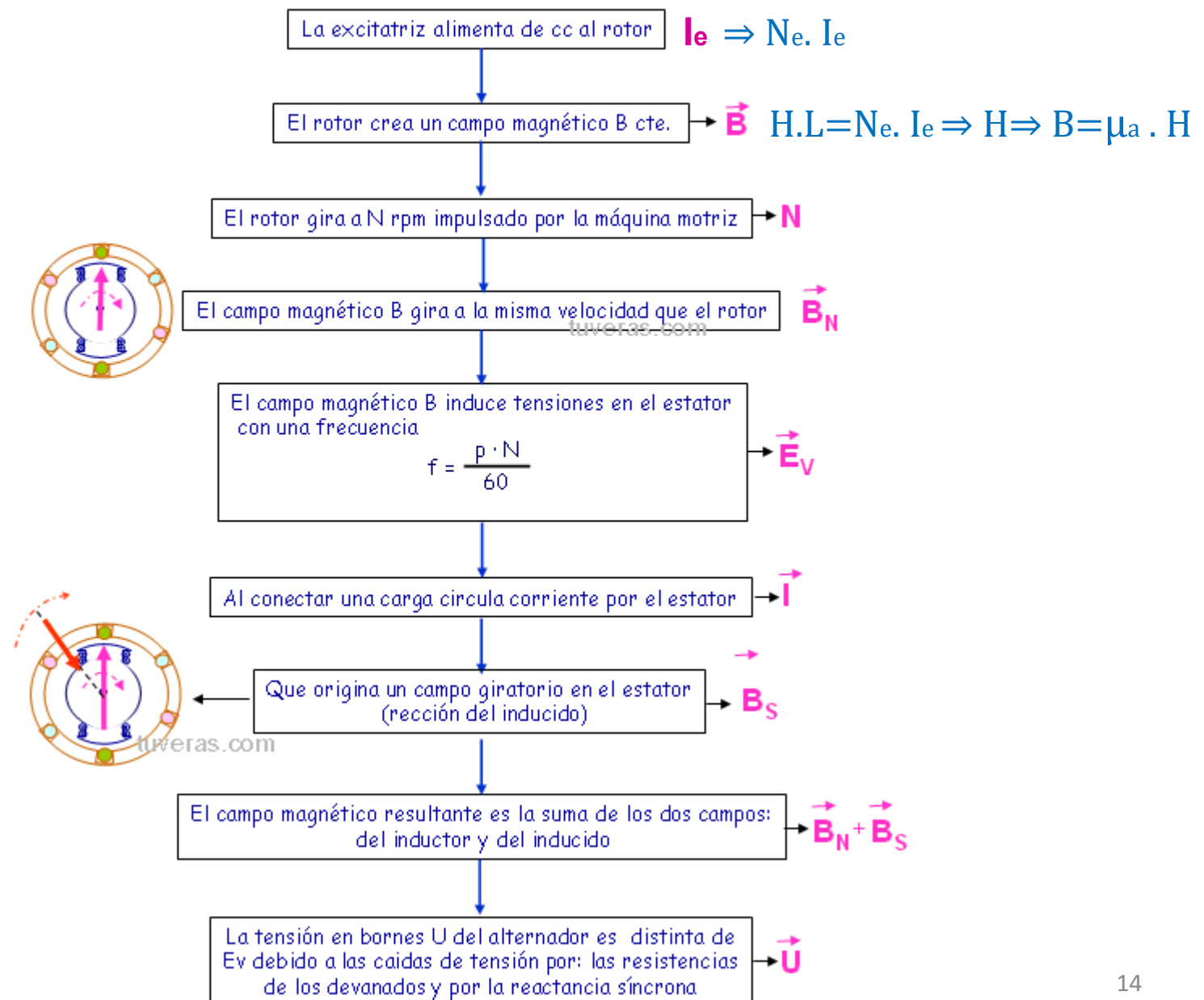
→ Son **REVERSIBLES**

En la actualidad la excitación del devanado inductor de la máquina se suele realizar de forma estática utilizando para ello un puente rectificador.

20/10/2021



Principio de Funcionamiento



Principio de funcionamiento

Como alternador

Una turbina acciona el rotor del alternador a la vez que se alimenta el devanado rotórico (devanado de campo) con corriente continua. El entrehierro variable (máquinas de polos salientes) o la distribución del devanado de campo (máquinas de rotor liso) contribuyen a crear un campo más o menos senoidal en el entrehierro, que hace aparecer en los bornes del devanado estático (devanado inducido) una tensión senoidal. Al conectar al devanado inducido una carga trifásica equilibrada aparece un sistema trifásico de corrientes y una fuerza electromotriz senoidal.

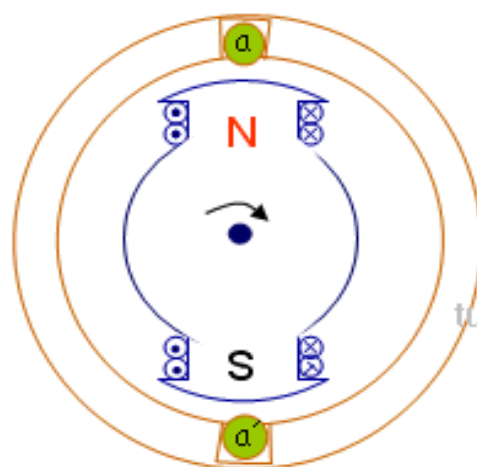
Como motor

En este caso se lleva al motor a la velocidad de sincronismo, pues la máquina síncrona no tiene par de arranque, y se alimentan el devanado rotórico (devanado de campo) con corriente continua y el devanado estático (devanado inducido) con corriente alterna. La interacción entre los campos creados por ambas corrientes mantiene el giro del rotor a la velocidad de sincronismo.

Revoluciones y Pares de Polos

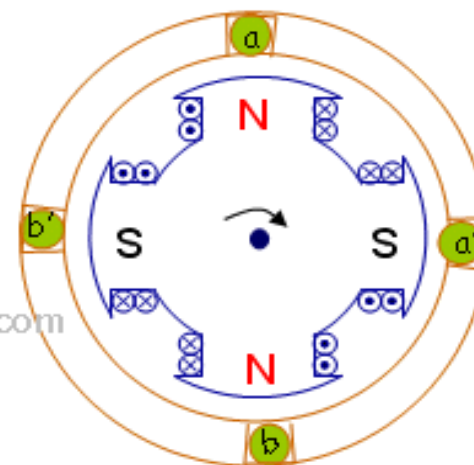
Principio de funcionamiento

Supongamos un alternador monofásico:



Si el rotor tiene un par de polos, **p=1** en la bobina **aa'** una vuelta del rotor implica un periodo de fem, y si N es la rpm del rotor la frecuencia de la fem es

$$f = \frac{N}{60}$$



Si el rotor tiene dos pares de polos, **p=2** en la bobina **aa'** una vuelta del rotor implica dos periodos de fem, y si N es la rpm del rotor la frecuencia de la fem es

$$f = \frac{2 \cdot N}{60}$$

En general, si el rotor tiene p pares de polos la frecuencia de la fem producida por el alternador es:

$$f = \frac{p \cdot N}{60}$$

Como la f suele estar impuesta por la red, $f = 50 \text{ Hz}$, esto significa que el alternador tendrá:

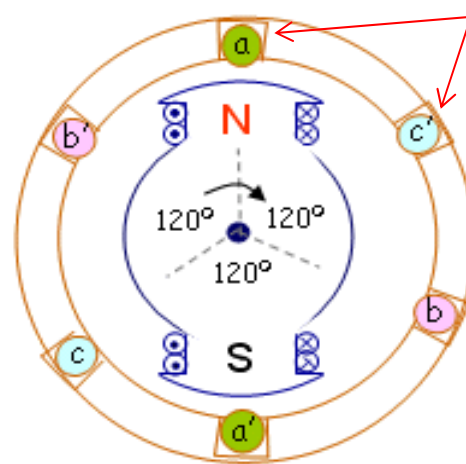
2 polos para 3000 rpm

4 polos para 1500 rpm

6 polos para 1000 rpm, etc.

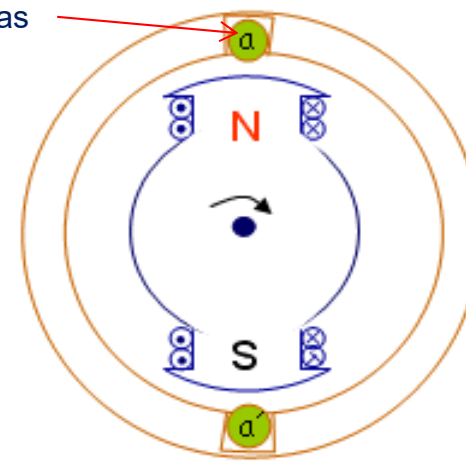
Alternador Trifásico

Principio de funcionamiento



Tres devanados (a-a', b-b', c-c')
desfasados 120°

Alternador Monofásico



Un devanado (a-a')

A. trifásico

Si se supone que las N espiras de cada fase están concentradas, y que el flujo concatenado por las mismas varía entre $+\Phi_m$ y $-\Phi_m$, el valor medio de la f.e.m. en el transcurso de medio periodo de la ca, será:

$$E_{med} = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} e dt = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} \left(-N \frac{d\Phi}{dt} \right) dt = -\frac{2}{T} N \int_{+\Phi_m}^{-\Phi_m} d\Phi = 4 f N \Phi_m$$

Teniendo en cuenta que el valor eficaz de la f.e.m es igual al valor medio multiplicado por el coeficiente de forma ξ_f de la onda producida, la f.e.m. eficaz E vendrá dada por: $E = 4 \xi_f f N \Phi_m$

Teniendo en cuenta que en la práctica las bobinas de cada fase están distribuidas sobre la periferia del estator, pudiendo además existir acortamiento de paso de cada bobina, entonces en la expresión anterior se han de tener en cuenta estos coeficientes de devanado ξ_d (coeficiente de distribución) y ξ_p (coeficiente de acortamiento del devanado o factor de paso) y, entonces, teniendo en cuenta que para ondas sinusoidales $\xi_f = 1,11$ el valor eficaz de f.e.m. inducida en un alternador, vendrá dada por:

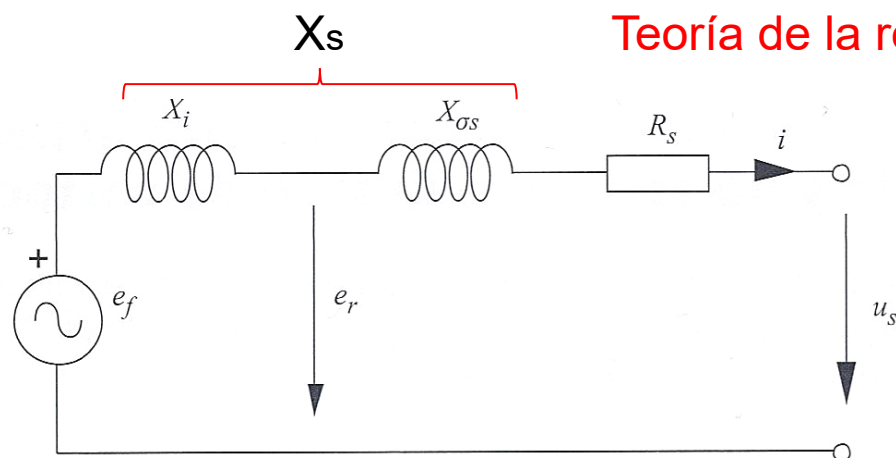
$$E = 4 \xi_f \xi_d \xi_p f N \Phi_m = 4 \cdot 1,11 \cdot \xi_1 \cdot f \cdot N \cdot \Phi_m = 4,44 \cdot \xi_1 \cdot f \cdot N \cdot \Phi_m$$

HIPÓTESIS DE MÁQUINA LINEAL (sin saturación)

$$\vec{F}_r = \vec{F}_f + \vec{F}_i$$

$$\vec{\Psi}_r = \vec{\Psi}_f + \vec{\Psi}_i$$

$$\vec{\varepsilon}_r = \vec{\varepsilon}_f + \vec{\varepsilon}_i$$



Circuito equivalente completo. Máquina sin saturación

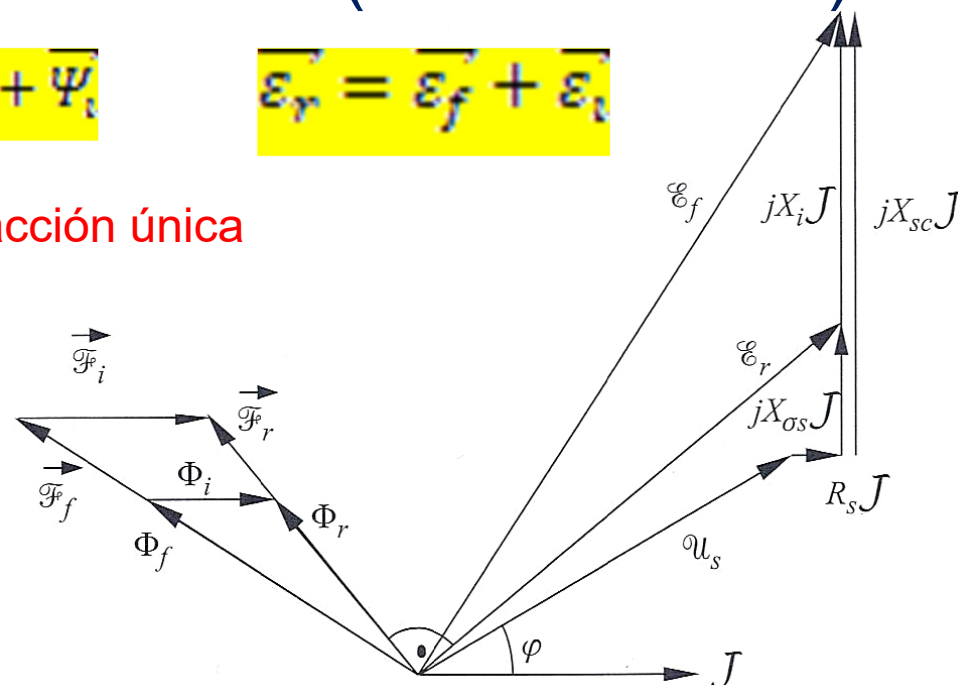


Diagrama fasorial. Máquina sin saturación

$$X_s = X_{sc} = X_{\sigma s} + X_i$$

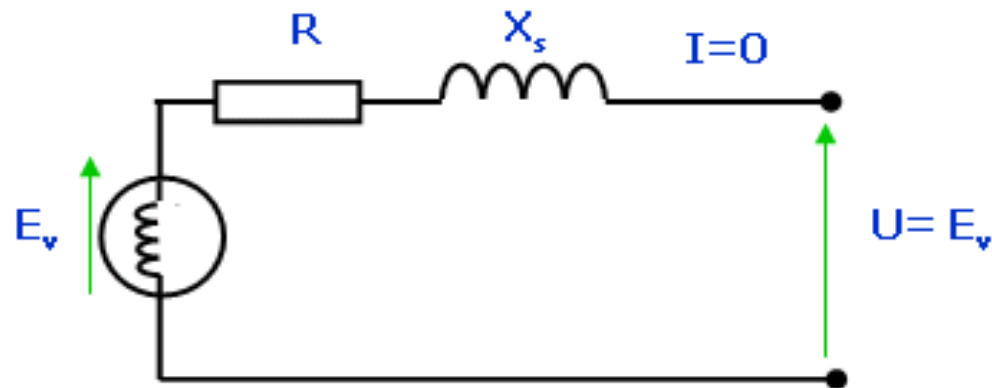
$$\vec{\varepsilon}_i = (-jX_i)I$$

$$\vec{E}_f = \vec{U}_s + (R_s + jX_{sc})\vec{I}$$

A la suma de las reactancias de reacción de inducido (X_i) y a la reactancia de dispersión ($X_{\sigma c}$) se le denomina normalmente **reactancia síncrona no saturada** (X_s) o **reactancia síncrona convencional** (X_{sc}).

Al conjunto ($R_s + jX_{sc}$), se le denomina **impedancia síncrona** (Z_s)

El Alternador en Vacío

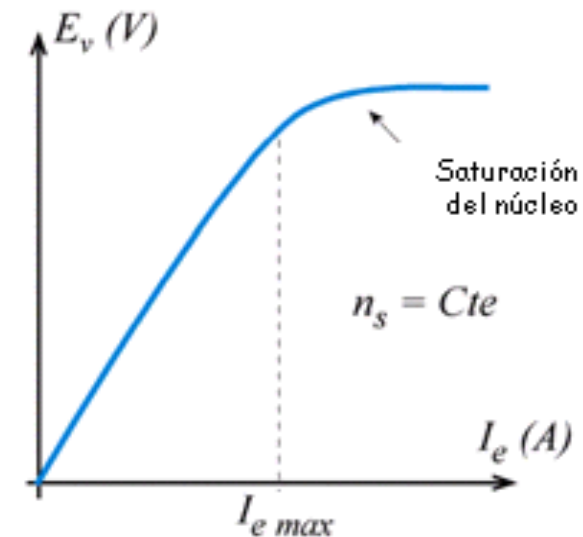


Circuito equivalente simplificado de la máquina síncrona
(no saturada)

Cuando el alternador trabaja en vacío no hay
caída de tensión y la tensión de salida U
coincide con la fem E_v

$$E_v = K \cdot N \cdot \Phi$$

$$\Phi = f(I_e)$$

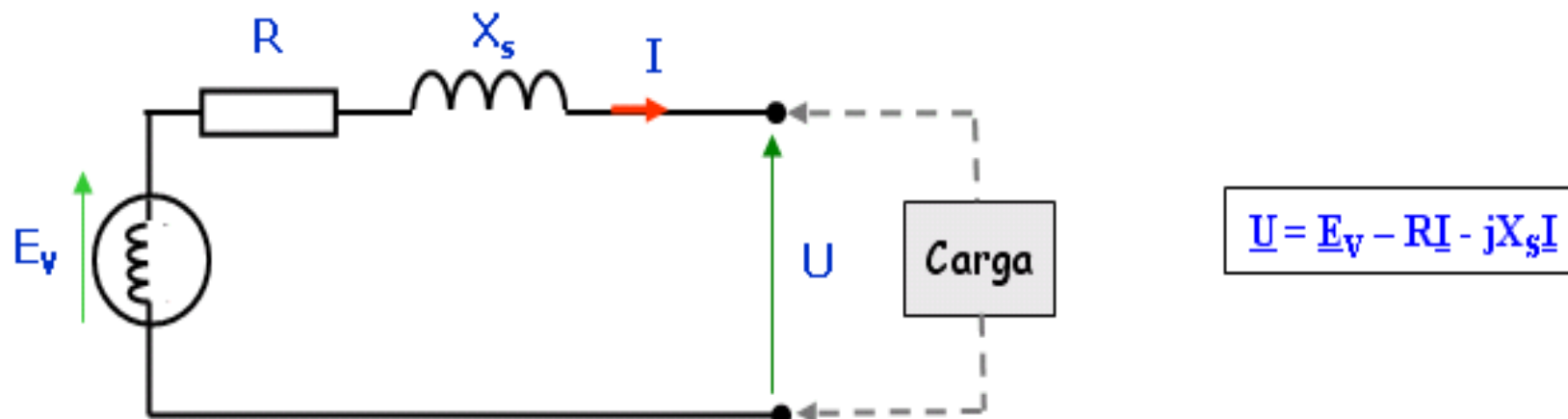


N = rpm
 Φ = flujo del inductor
 I_e = Intensidad de excitación
 K = cte. De proporcionalidad

- La determinación de esta curva se realiza experimentalmente.
- Se observa que la característica de vacío es similar a la curva de magnetización del hierro

Circuito Equivalente. Diagrama de Behn-Schenburg

Para una máquina de polos lisos y circuito magnético no saturado



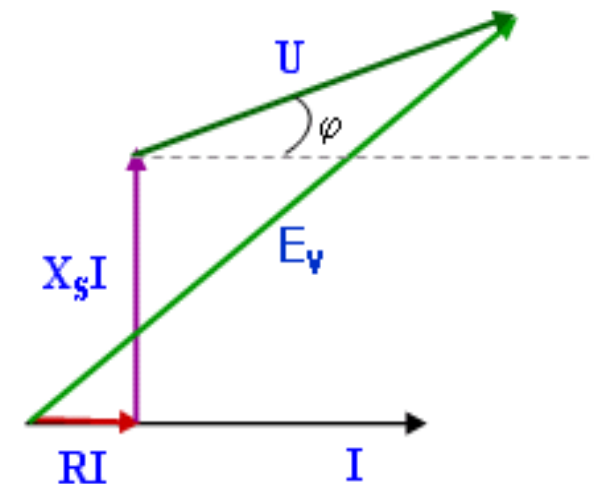
Circuito equivalente simplificado de la máquina síncrona
(no saturada)

R = resistencia inducido por fase

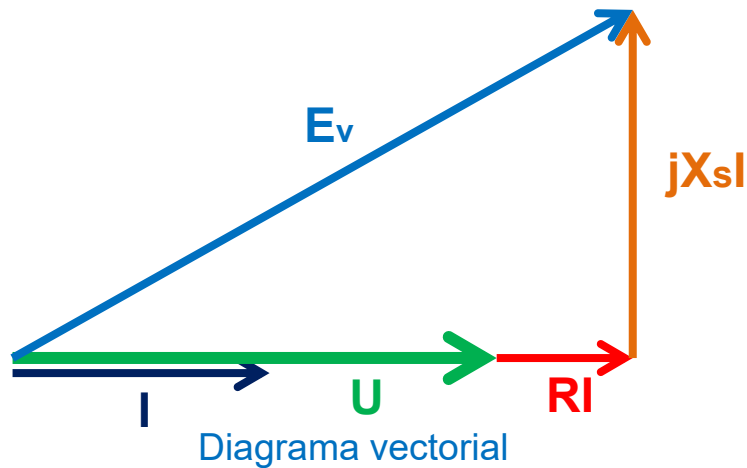
X_s = reactancia síncrona por fase =
reactancia de dispersión + reactancia
de reacción del inducido

E_v = tensión en vacío por fase

U = tensión en carga por fase



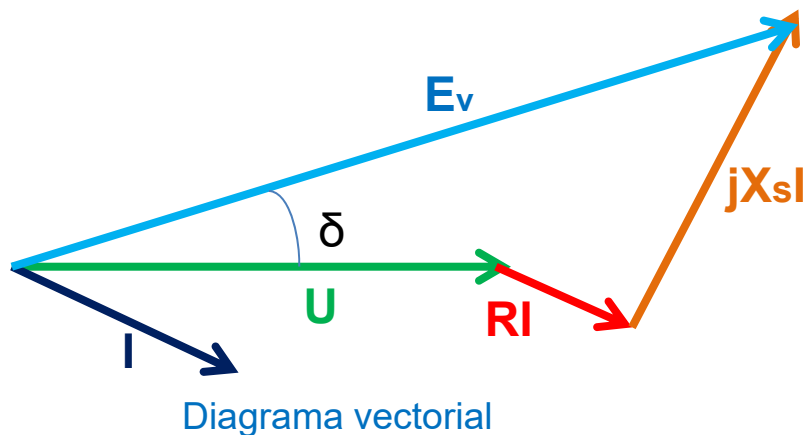
Funcionamiento en carga del alternador - con carga resistiva



Si la carga es resistiva pura el f.d.p. es la unidad y la diferencia de fase entre la f.e.m. en vacío E_v y la corriente I , lo marca la caída de tensión en la reactancia sincrónica, $jX_s I$, si esa caída fuese despreciable entonces la f.e.m. estaría en fase con la corriente

$$\vec{E}_v = \vec{U} + (R + jX_s) \cdot \vec{I}$$

Funcionamiento en carga del alternador - con carga inductiva

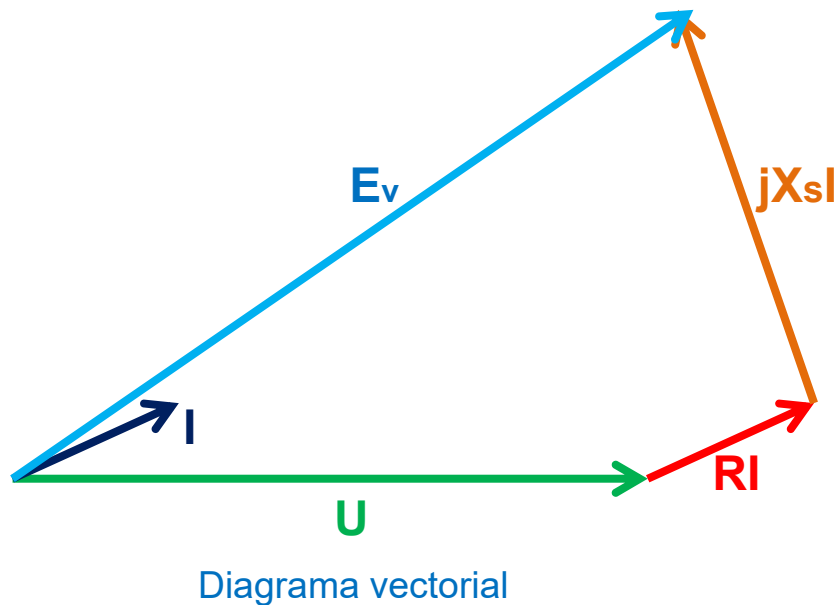


$$\vec{E}_v = \vec{U} + (R + jX_s) \cdot \vec{I}$$

Cuando la carga es inductiva pura el desfase entre la tensión U y la corriente I es de 90° , con la corriente retrasada en relación con la tensión. En este caso, el máximo de las corrientes estará desplazado en el espacio respecto al máximo de la f.e.m. E_v un ángulo próximo a 90° ($90^\circ + \delta$).

Para otros casos intermedios de cargas con reactancia inductiva y resistencia el diagrama vectorial será como el de la figura.

Funcionamiento en carga del alternador - con carga capacitiva



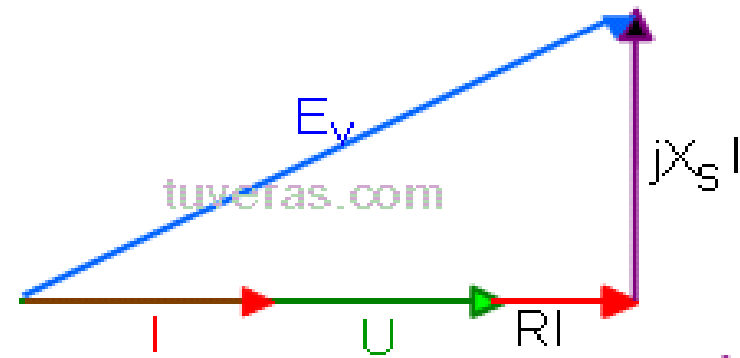
$$\vec{E}_v = \vec{U} + (R + jX_s) \cdot \vec{I}$$

Cuando la carga es capacitiva pura, la corriente del estator alcanzará su máximo unos 90° eléctricos antes de que el polo inductor correspondiente se enfrente a los conductores que forman las espiras del inducido, que es el momento en que es máxima la f.e.m. Los polos reales (creados por el inductor) estarán enfrentados a los polos ficticios (los creados por el inducido) de distinto signo. La situación es similar a la del caso de carga inductiva, pero con cargas capacitivas se puede comprobar que se obtiene un refuerzo de la f.e.m. del inductor, lo que significa que las **cargas capacitivas** ayudan a la acción del campo de los polos principales. Se dice que provocan un **efecto magnetizante** sobre el flujo.

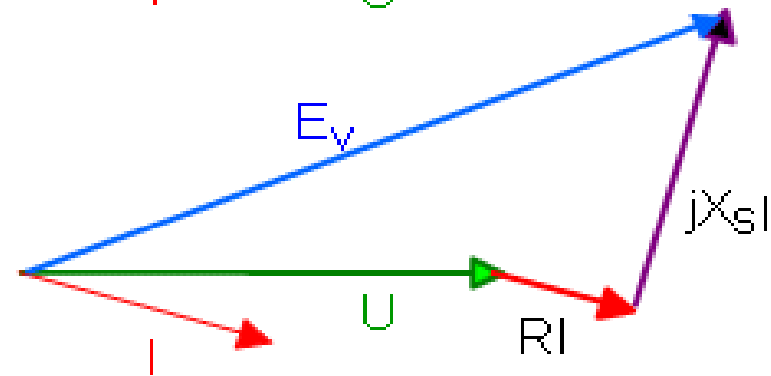
Para otros casos intermedios de cargas con reactancia capacitiva y resistencia el diagrama vectorial será como el de la figura.

El Alternador con Diferentes Cargas

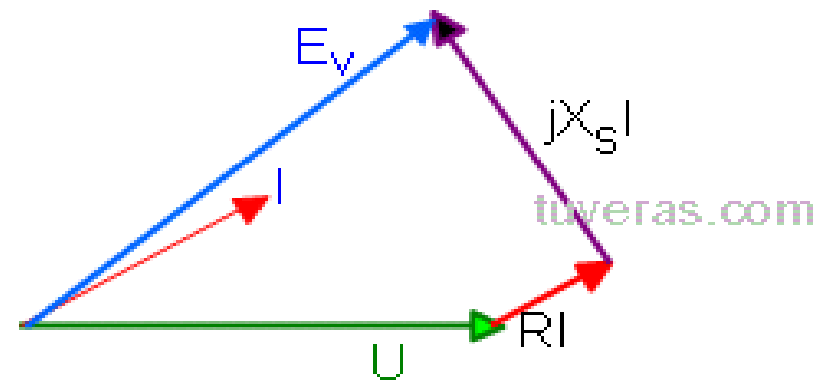
Carga resistiva



Carga Inductiva



Carga capacitiva

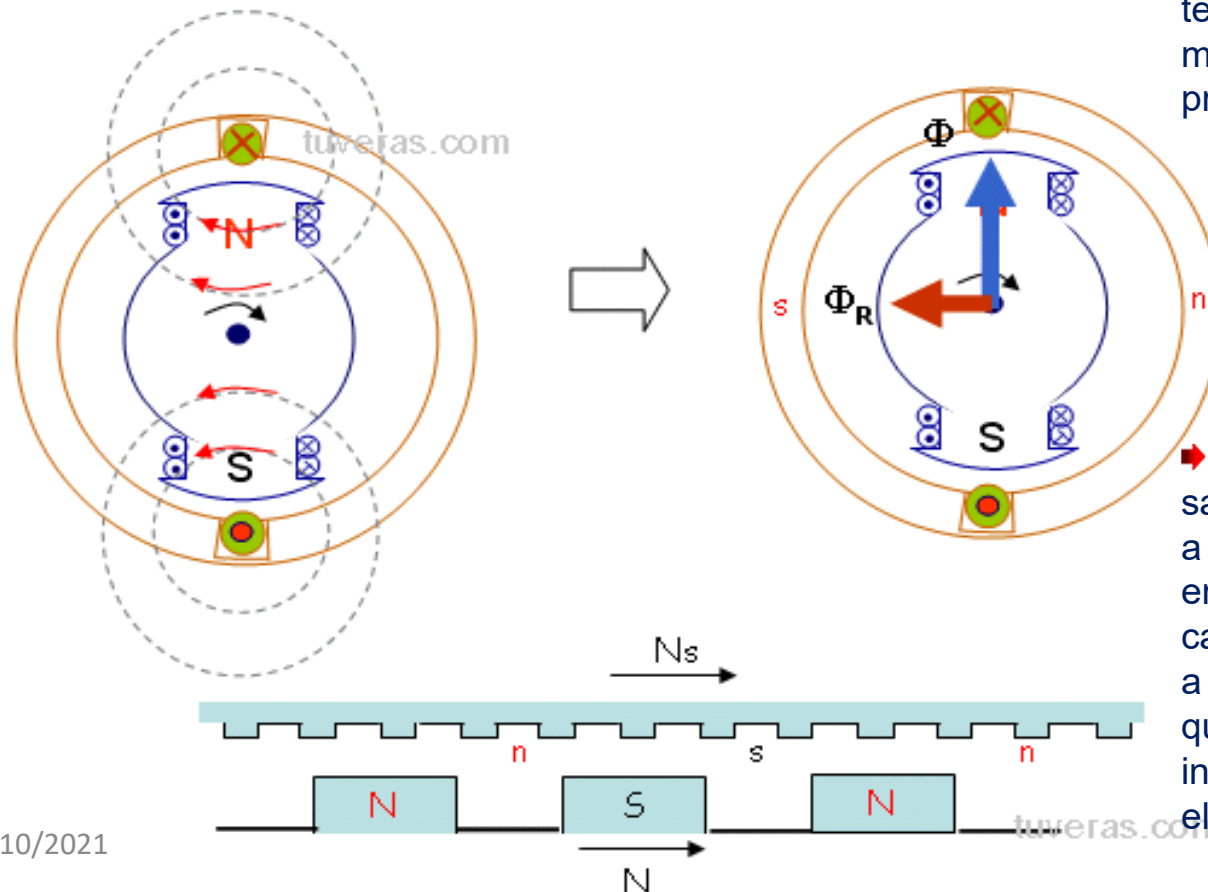


Reacción del Inducido

Cuando una corriente circula por el inducido, el flujo ya no está engendrado sólo por el inductor, sino que a la acción de éste se le superpone el flujo creado por el inducido (polos ficticios). Este fenómeno se denomina **reacción del inducido**

Circuito de consumo resistivo. Reacción transversal

La tensión y la corriente en el inducido están en fase.
Los polos ficticios están intercalados entre los polos del inductor.

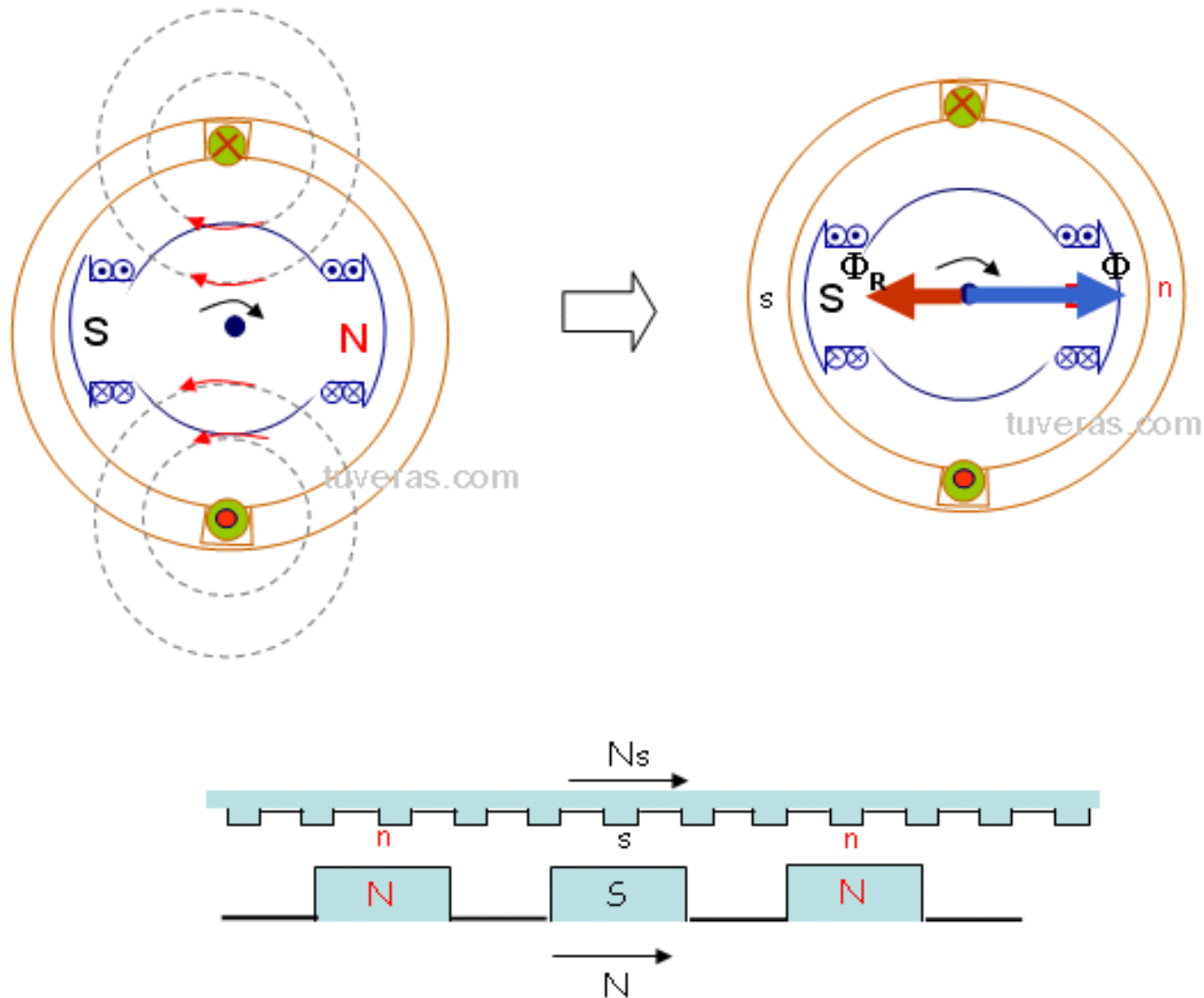


► En carga, se obtiene una tensión en bornes de la máquina inferior al valor que presentaba en vacío E_v .

► La reducción en la tensión de salida del generador es debida a la aparición de una corriente en el inducido que provoca una caída de tensión en este circuito a la vez que produce una f.m.m. que reacciona con la del inductor modificando el flujo en el entrehierro de la máquina.

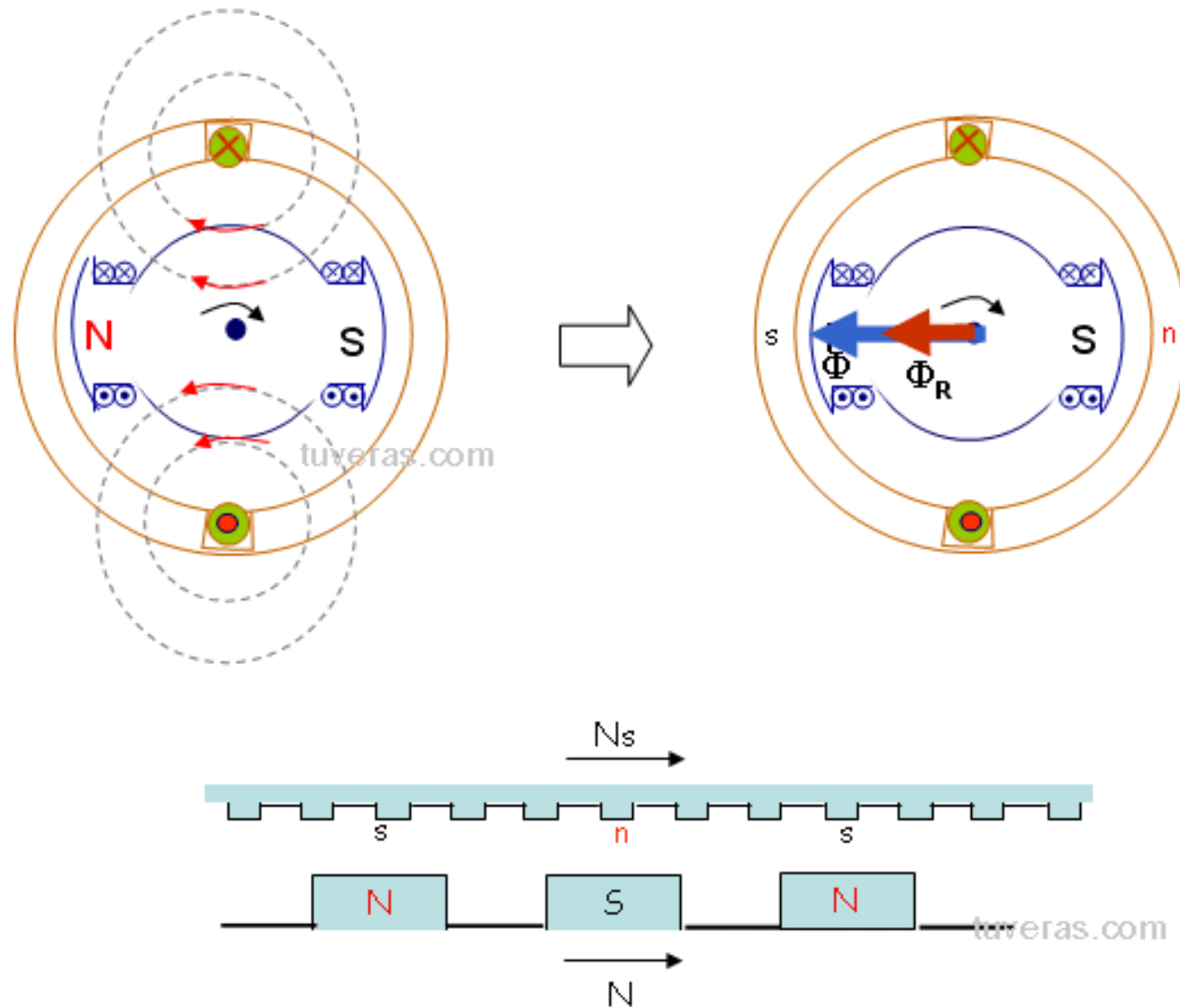
Circuito de consumo inductivo. Reacción longitudinal sustractiva

La corriente en el inducido atrasa $\pi/2$ rad, $1/4$ de periodo, respecto a la tensión. En ese tiempo el rotor gira 90° . Los polos ficticios están enfrente a los polos del inductor del mismo signo.

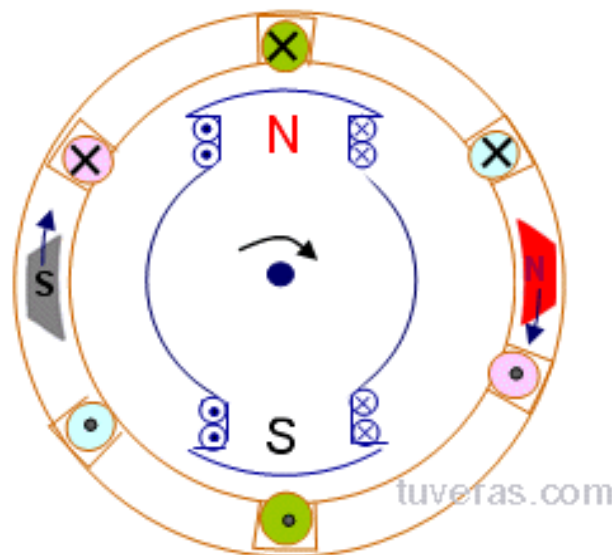


Circuito de consumo capacitivo. Reacción longitudinal aditiva

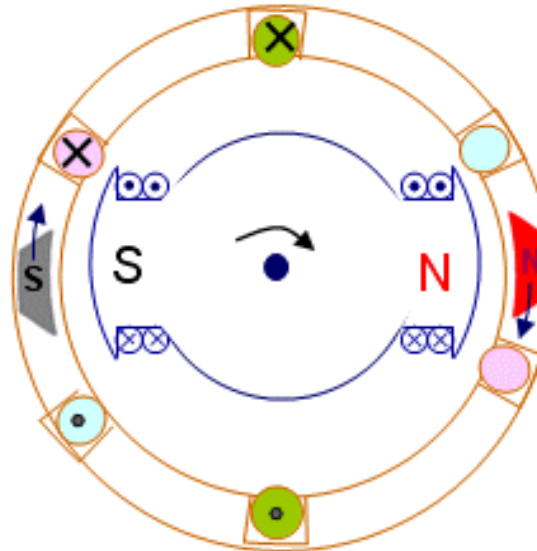
La corriente en el inducido adelanta $\pi/2$ rad, $1/4$ de periodo, respecto a la tensión. En ese tiempo el rotor gira 90°
 Los polos ficticios están enfrente a los polos del inductor de signo opuesto.



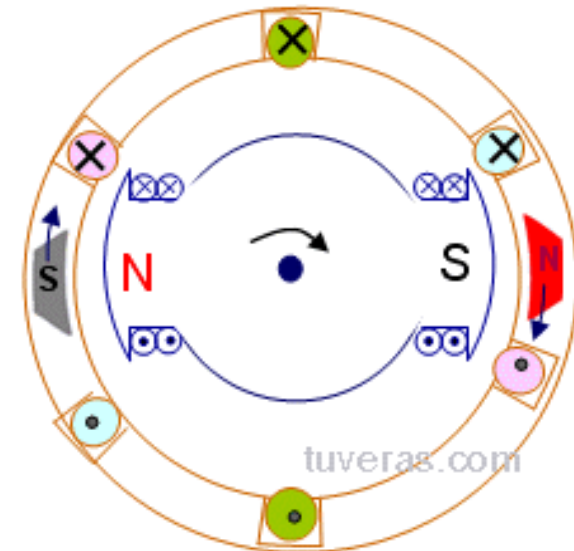
Resumen de la Reacción del Inducido en un Alternador



**Circuito Resistivo:
Reacción Transversal**



**Circuito Inductivo:
Reacción Longitudinal
Sustractiva**



**Circuito Capacitivo:
Reacción Longitudinal
Aditiva**

Efectos de la Reacción del Inducido

En el caso general del receptor inductivo la corriente del inducido I se puede descomponer en una corriente I_a en fase con la fem y una corriente I_r retrasada $\pi/2$ rad respecto de aquella. Esto origina:

- a) Una reacción transversal que provoca una distorsión del flujo, aumentando el campo magnético sobre un cuerno polar y disminuyéndolo en el otro, dando lugar a una disminución de flujo útil
- b) Una reacción longitudinal que al ser sustractiva, reduce el flujo de forma más significativa que la precedente

El alternador en carga recibe potencia mecánica que transforma en potencia eléctrica. Opone a la máquina motriz que le arrastra un par resistente C_r , tal que

$$P = C_r \cdot \omega$$

P = Potencia mecánica recibida
 ω = Velocidad angular del rotor

Este par es debido a las fuerzas magnéticas tangenciales que se ejercen entre los polos reales y ficticios.

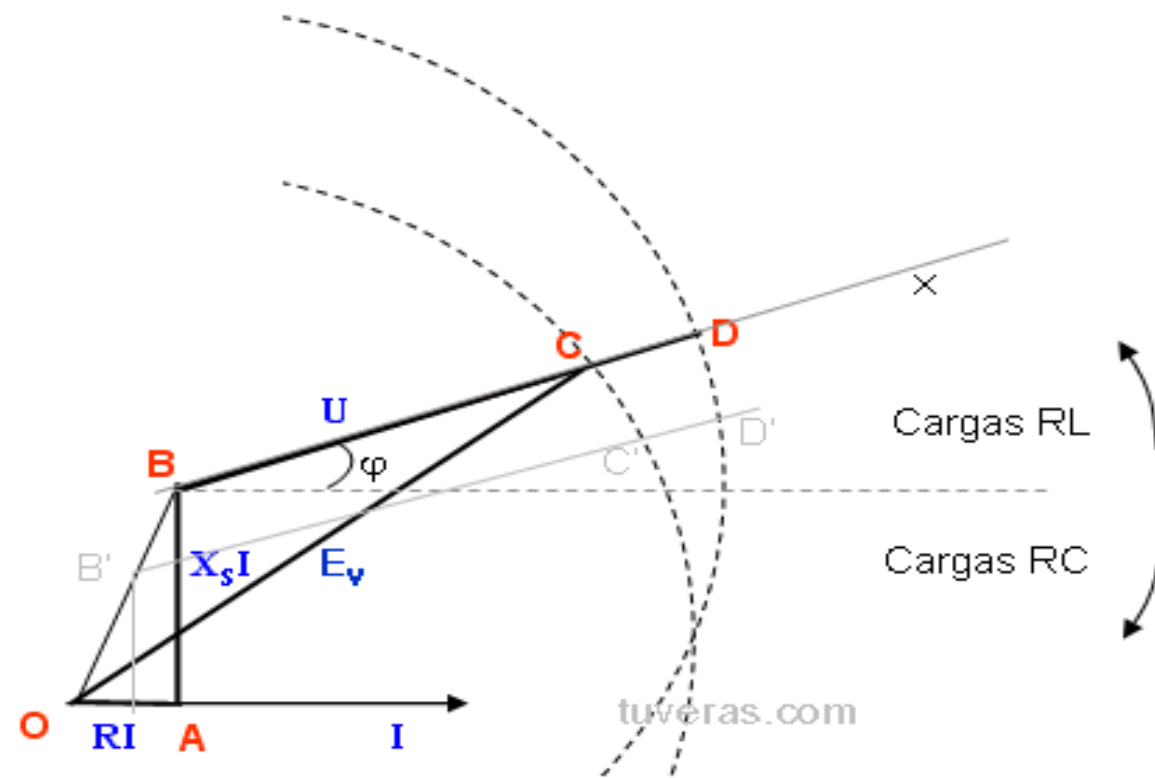
Nótese como en el caso de la carga inductiva pura o la capacitiva pura, los polos inductores y ficticios están en línea, y en consecuencia no habrían fuerzas magnéticas tangenciales y por lo tanto no habría tampoco par resistente y $P = 0$

Diagrama de Behn-Schenburg: Caída de Tensión

- Se excita el alternador con una corriente I_e .
- Se sabe que ha de suministrar I amperios con un $\cos \varphi$
- ¿Cuál será la tensión U en bornes del alternador?
- Se conoce R y X_s

- 
- Se traza el triángulo **OAB**
 - Desde **B** y con un ángulo φ se traza una **recta x**
 - Con centro en **O** se traza una circunferencia de radio **OC** (E_v) que corta a x en **C**
 - Con centro en **B** trazamos una circunferencia de radio **BD** (E_v) que corta a x en **D**
 - La **caída de tensión** en el alternador = $E_v - U = \mathbf{BD} - \mathbf{BC} = \mathbf{CD}$

Diagrama de Behn-Schenburg



$I = \text{cte.}$
 $\cos \varphi = \text{variable}$

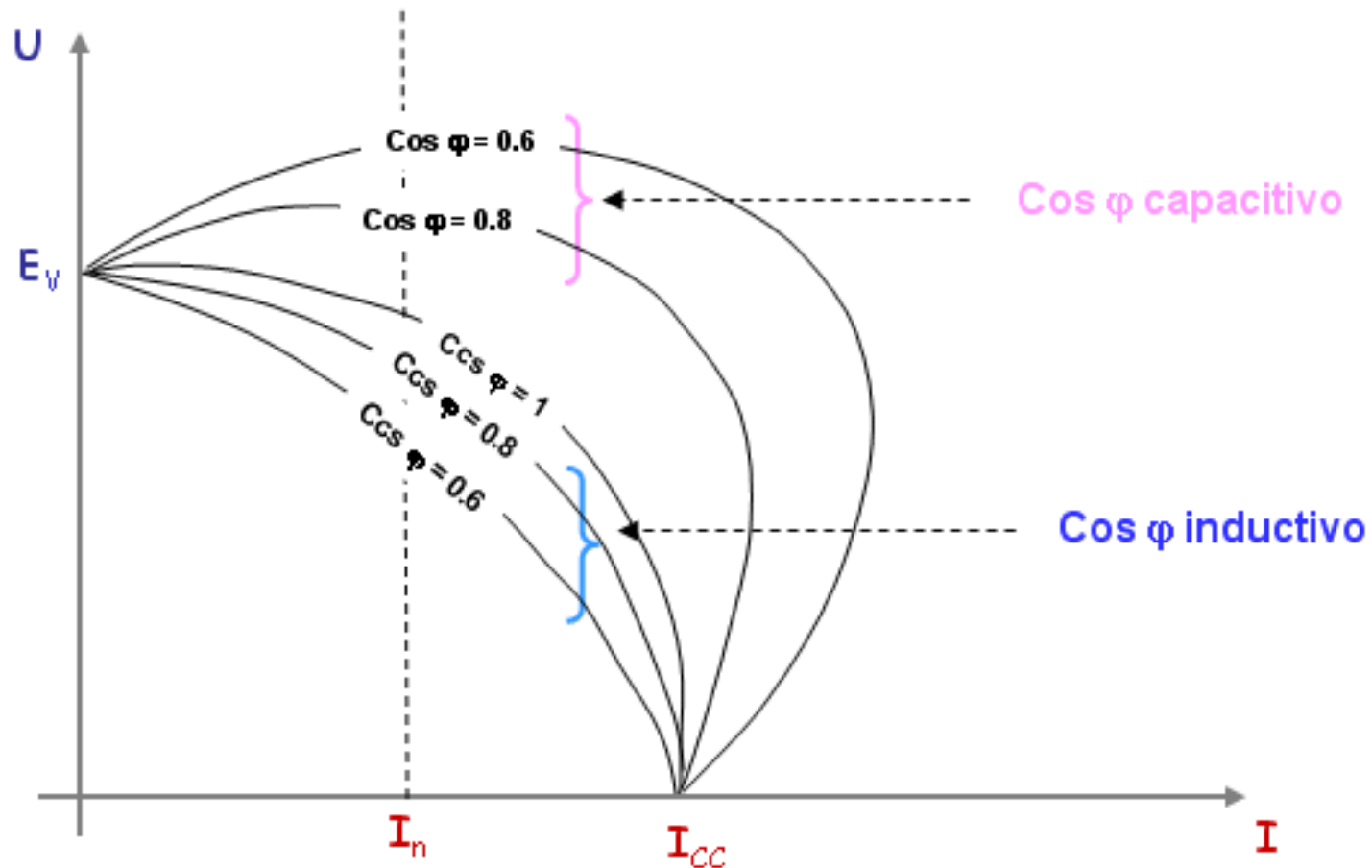
- Cuando disminuye el fdp (aumenta φ) aumenta la caída de tensión
- La tensión en carga puede ser superior a la de vacío cuando alimenta una carga capacitiva

$\cos \varphi = \text{cte.}$
 $I = \text{variable}$

- La caída de tensión crece con la intensidad suministrada ($CD > C'D'$)
- Con cargas capacitivas la tensión en carga puede aumentar con la corriente suministrada

Característica exterior

La curva que **representa la tensión en bornes (U)** del alternador en función de la **corriente de carga (I)** se denomina característica exterior. En la figura se representan cinco de estas curvas, dos con factores de potencia (fdp) capacitivo, dos con fdp inductivo y una con fdp=1 (resistivo).



La placa de un alternador suelen llevar la indicación de un valor del $\cos \varphi$. Es el factor de potencia de la red por debajo del cual el constructor no garantiza la posibilidad de obtener U_n cuando la corriente consumida es I_n

26/10/2021

Característica de regulación

Si se desea mantener constante la tensión en bornes de la máquina al variar la corriente del inducido, será preciso variar de forma adecuada la correspondiente excitación para que compense las caídas de tensión que se producen en la máquina en carga. Las curvas que muestran las relaciones entre las corrientes de excitación y las corrientes de carga para obtener una tensión de salida constante se muestran en la figura para distintos factores de potencia y estas curvas se conocen como **características de regulación**.

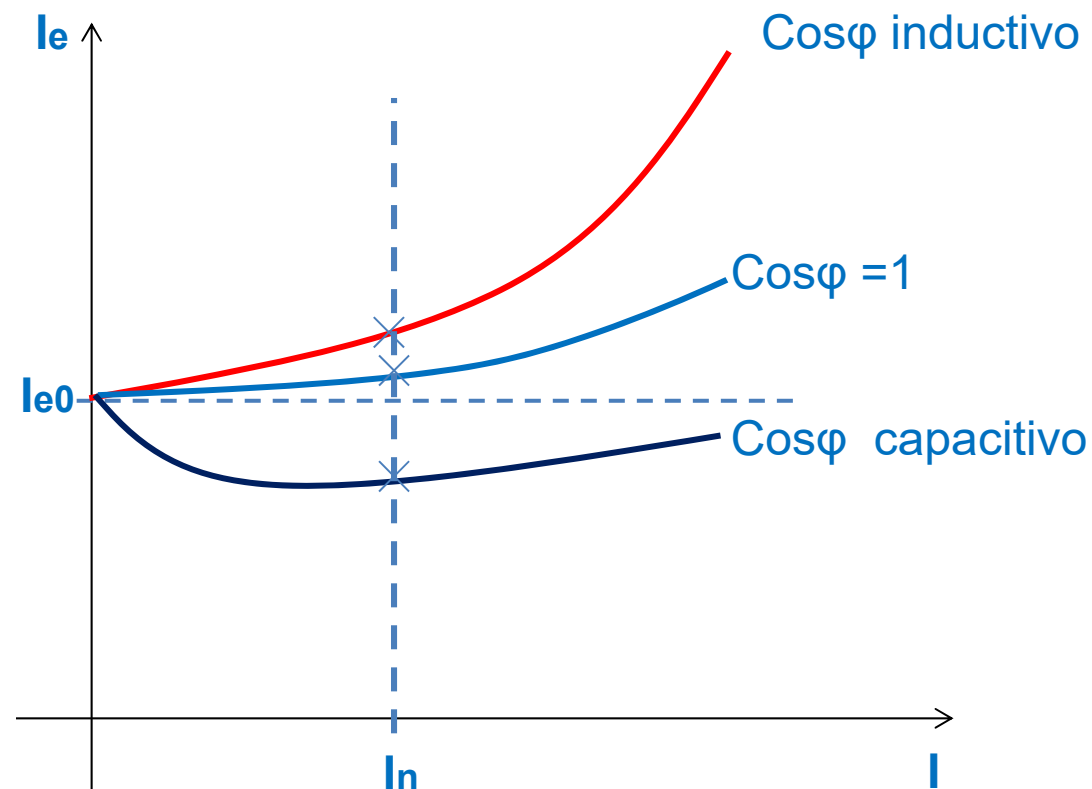


Diagrama de Benh-Schemburg: Determinación de la reactancia síncrona

- ➡ Este método, tuvo como objetivo inicial el poder predeterminar la caída de tensión de un alternador. Se aplica a máquinas con rotor liso (cilíndrico) que trabajan en régimen lineal (no saturadas), lo que significa que los flujos son proporcionales a las f.m.m.s. y por lo tanto se puede aplicar el principio de superposición.
- ➡ La ventaja de este método es que permite obtener un circuito eléctrico equivalente aproximado y sencillo de la máquina síncrona, con las ventajas analíticas que supone.
- ➡ Se sabe que en realidad existe un flujo único en el entrehierro de la máquina síncrona, producido por la acción conjunta de las f.m.m.s. de excitación F_f y de reacción de inducido F_i . Sin embargo, resulta más cómodo considerar que cada f.m.m. produce un flujo independiente que crea a su vez su correspondiente f.e.m. inducida. De esta forma, se trabaja únicamente con f.e.m.s. y magnitudes eléctricas, dejando a un lado las magnitudes magnéticas.

Diagrama de Behn-Schenburg: Determinación de la Reactancia Síncrona

Se ha de realizar:

- **Prueba en Vacío**, para obtener la característica en vacío $E_v = f(I_e)$
- **Prueba en Cortocircuito**, para obtener la característica $I_{cc} = f(I_e)$
- Obtener la reactancia síncrona X_s

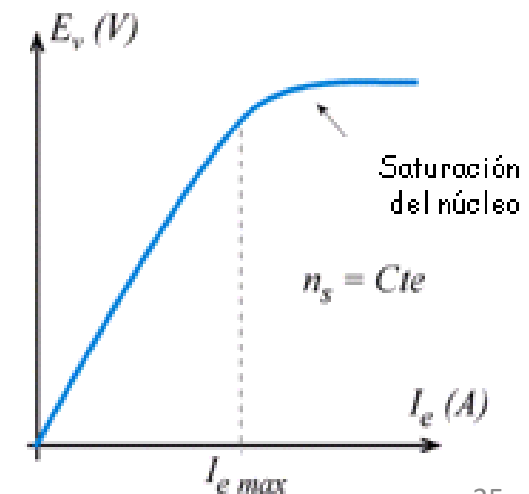
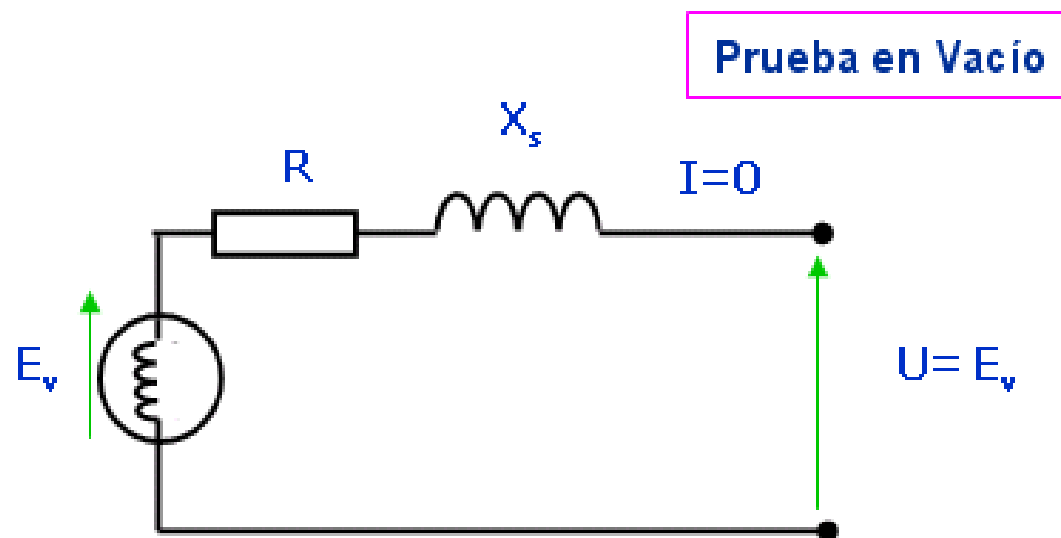
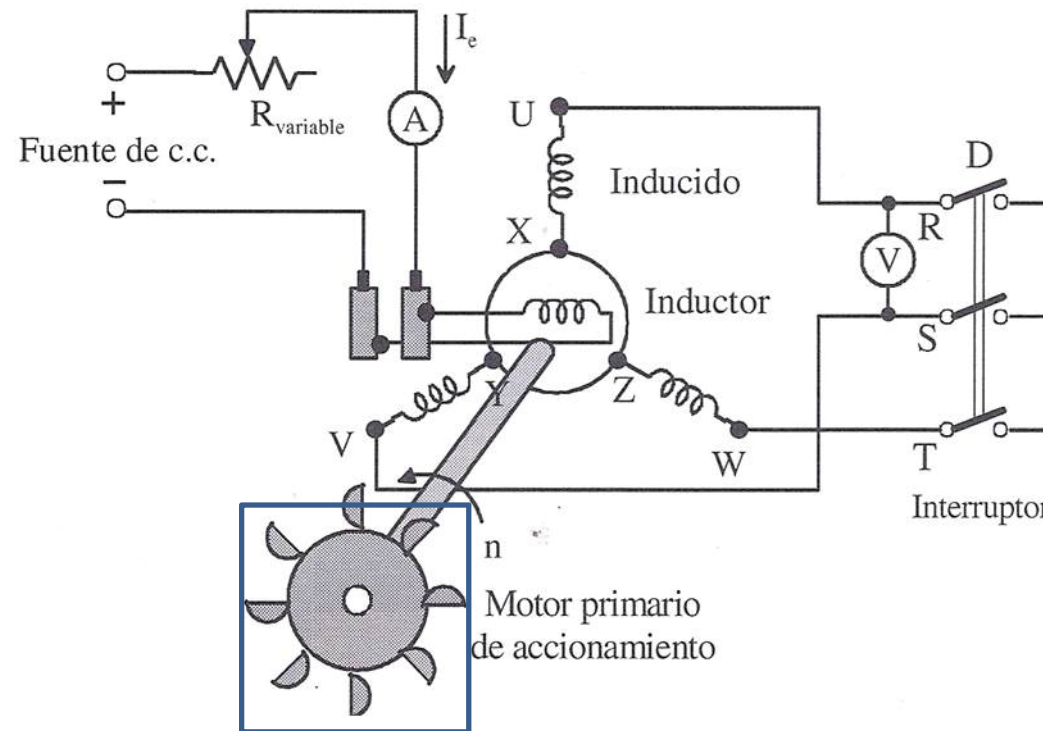


Diagrama de Benh-Schemburg: Determinación de la reactancia síncrona

Características de vacío y de cortocircuito

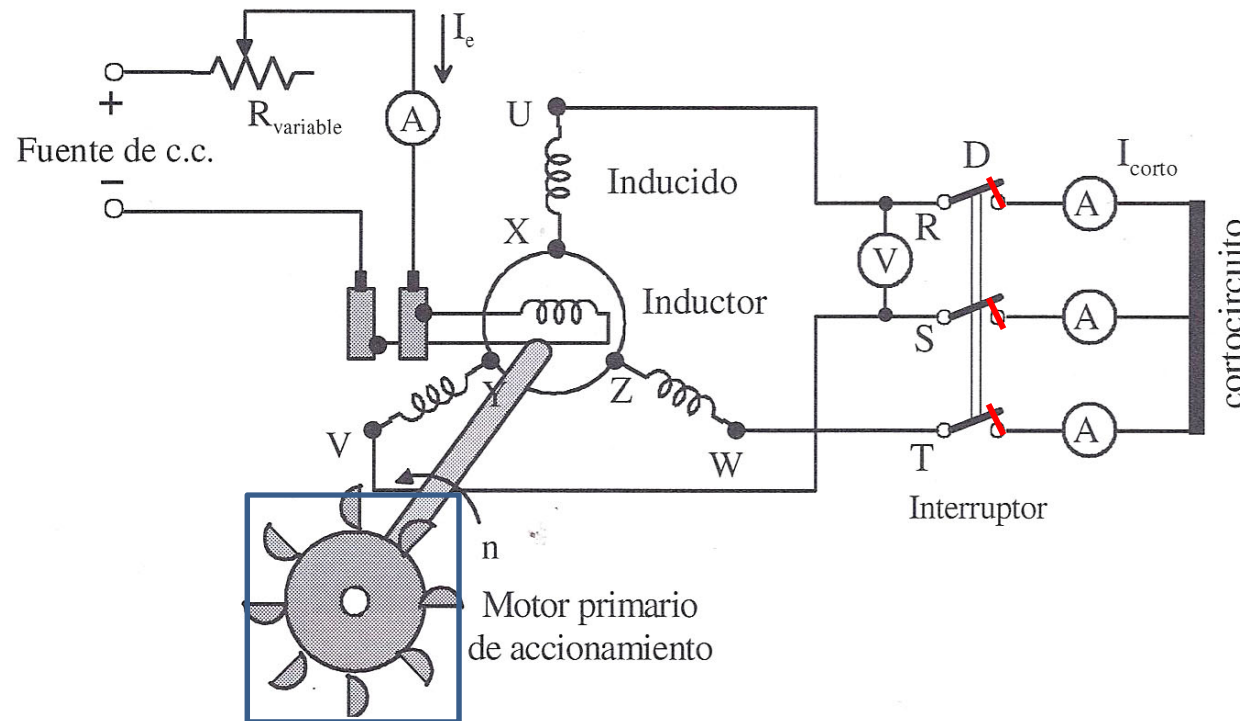


Esquema eléctrico para la realización del ensayo en vacío del alternador

Ensayo de vacío. Se mueve la máquina a la velocidad de sincronismo accionada por un motor primario externo y se deja abierto el interruptor D. Se alimenta el inductor por una fuente auxiliar regulable de c.c. y se van midiendo simultáneamente la corriente de excitación y la tensión de salida. (En el caso de la figura se está midiendo la tensión compuesta de vacío, por lo que el valor de E_v (de fase) será igual a la lectura del voltímetro dividida por $\sqrt{3}$ (conexión en Y). Estas medidas dan lugar a la característica de vacío: **$E_v = f(I_e)$** .

Diagrama de Benh-Schemburg: Determinación de la reactancia síncrona

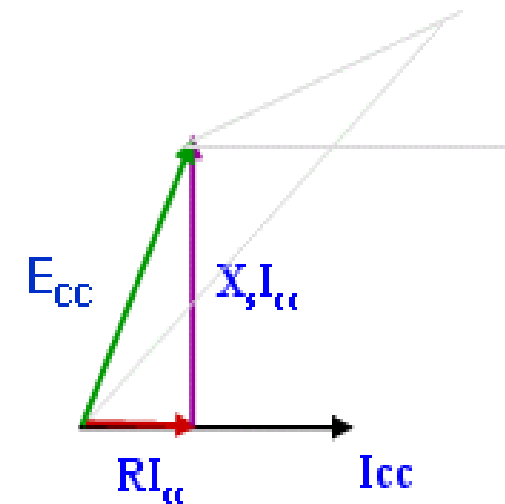
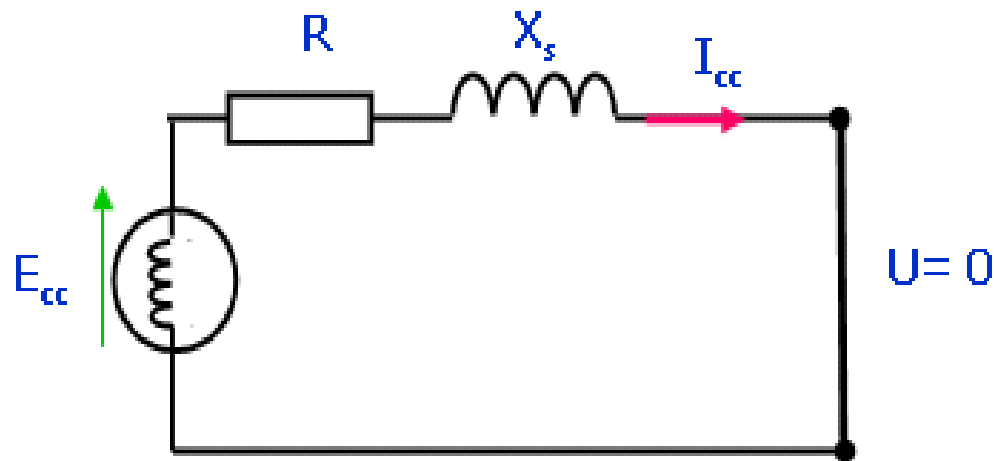
Características de vacío y de cortocircuito



Esquema eléctrico para la realización del ensayo de cortocircuito del alternador

Ensayo de cortocircuito. Se mueve el alternador a la velocidad de sincronismo accionada por un motor primario externo, se mantiene el rotor desexcitado ($I_e=0$) y se cierra el interruptor D . A continuación se va elevando gradualmente la corriente de excitación hasta que los amperímetros de inducido lleguen al 130% de la corriente nominal. La curva que representa $I_{cc}=f(I_e)$ se denomina **característica de cortocircuito** y es prácticamente una línea recta, debido a que en estas condiciones el circuito magnético no está saturado.

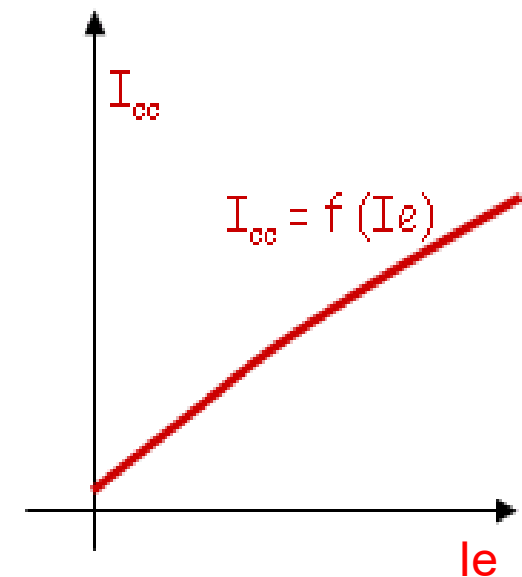
Prueba en Cortocircuito



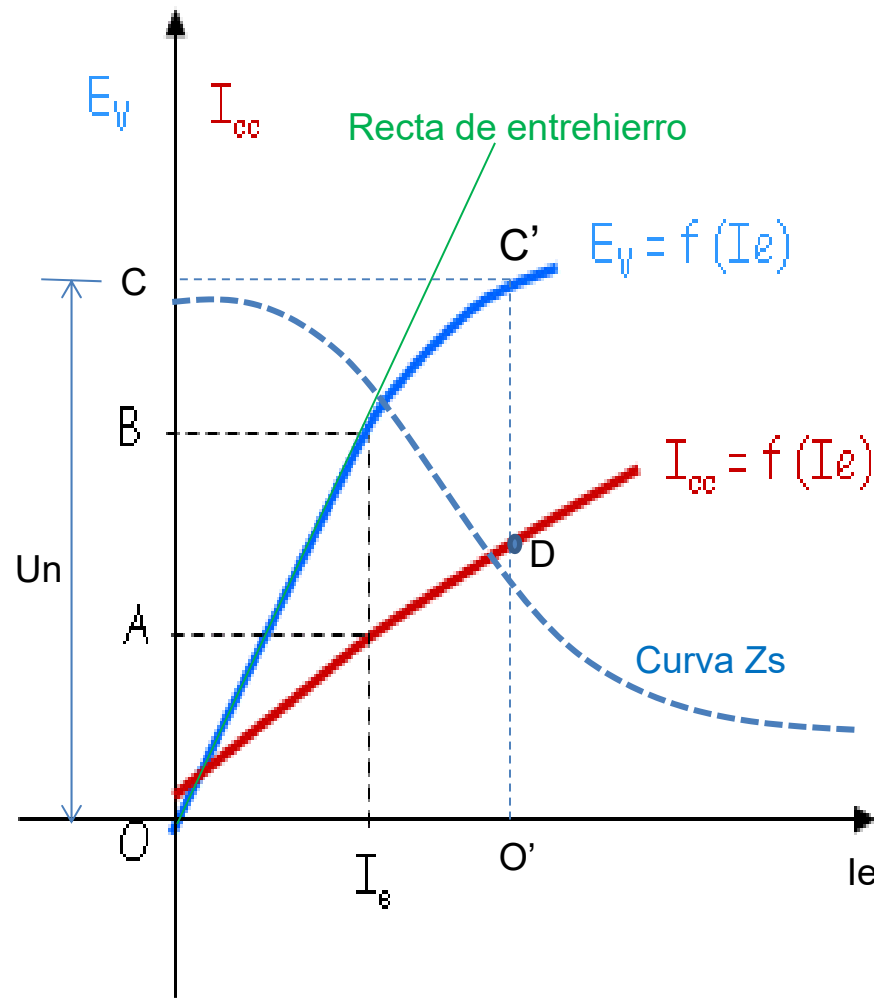
$$\left. \begin{aligned} U &= E_v - RI - jX_s I \\ 0 &= E_{cc} - RI_{cc} - jX_s I_{cc} \\ E_{cc} &= RI_{cc} + jX_s I_{cc} \end{aligned} \right\} \begin{aligned} E_{cc} &= \sqrt{(R^2 + X_s^2)} I_{cc} \\ E_{cc} &\text{ fem creada por } I_e \end{aligned} \right\} I_{cc} = f(I_e)$$

Las magnitudes anteriores deben expresarse “**por fase**”. Además debe tenerse en cuenta que E_{cc} e I_{cc} dependen de la corriente de excitación de la máquina y, por lo tanto, su cociente también depende de esta corriente de excitación

$$Z_s = \frac{E_{cc}}{I_{cc}} = \sqrt{(R^2 + X_s^2)}$$



Determinación de la impedancia síncrona



Características de vacío y cortocircuito de la máquina síncrona

$$Z_s = \sqrt{R^2 + X_s^2} = \frac{E_{cc}}{I_{cc}} = \frac{OB}{OA} \quad \Omega/\text{fase}$$

Impedancia síncrona no saturada

Como se puede medir la resistencia R del inducido, la relación anterior permite deducir la reactancia síncrona X_s de Behn-Schenburg

$$X_s = \sqrt{Z_s^2 - R^2}$$

$$Z_s (\text{saturada}) = Z_s = \frac{OC}{O'D}$$

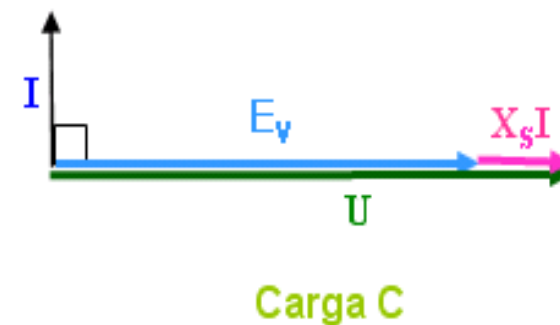
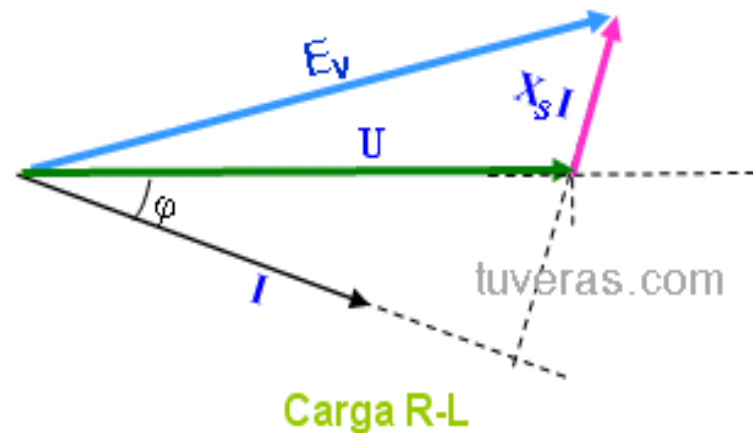
Generalmente, para reducir el tamaño de la máquina, se requiere que el circuito magnético trabaje en el codo de la curva de vacío.

Diagrama de Behn-Schenburg Simplificado

Considerando en el diagrama de Behn-Schenburg que $R \ll X_s$ lo podemos simplificar, nos queda la fórmula:

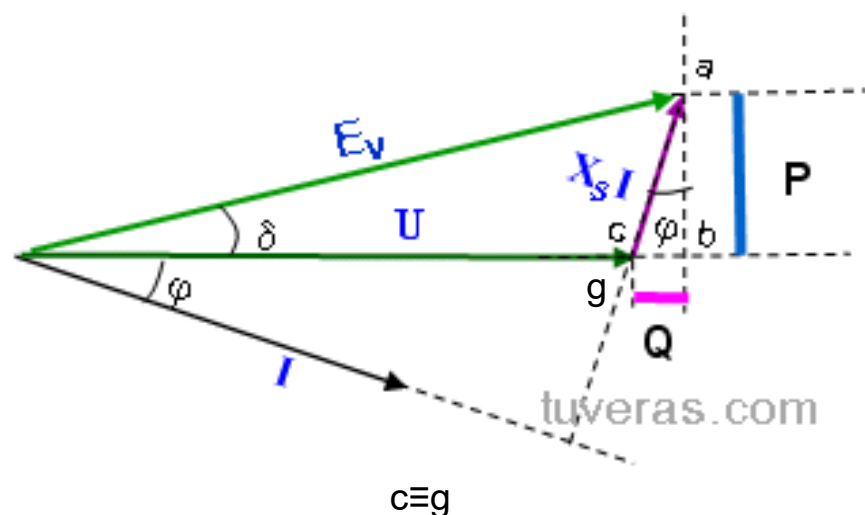
$$\underline{U} = \underline{E}_v - jX_s I$$

Y los esquemas con diferentes cargas serán:



Representación de las Potencias

A continuación comprobamos que los segmentos **ab** y **cb** representan las potencias **P** y **Q** del alternador, el segmento **ga** la corriente **I** y que **P** es función del ángulo **δ**



$$ab = X_S \mid \cos \varphi$$

$$\mathbf{ab} = \frac{X_S U \cos \varphi}{U} = \mathbf{kP}$$

$$bc = X_S \mid \text{sen } \varphi$$

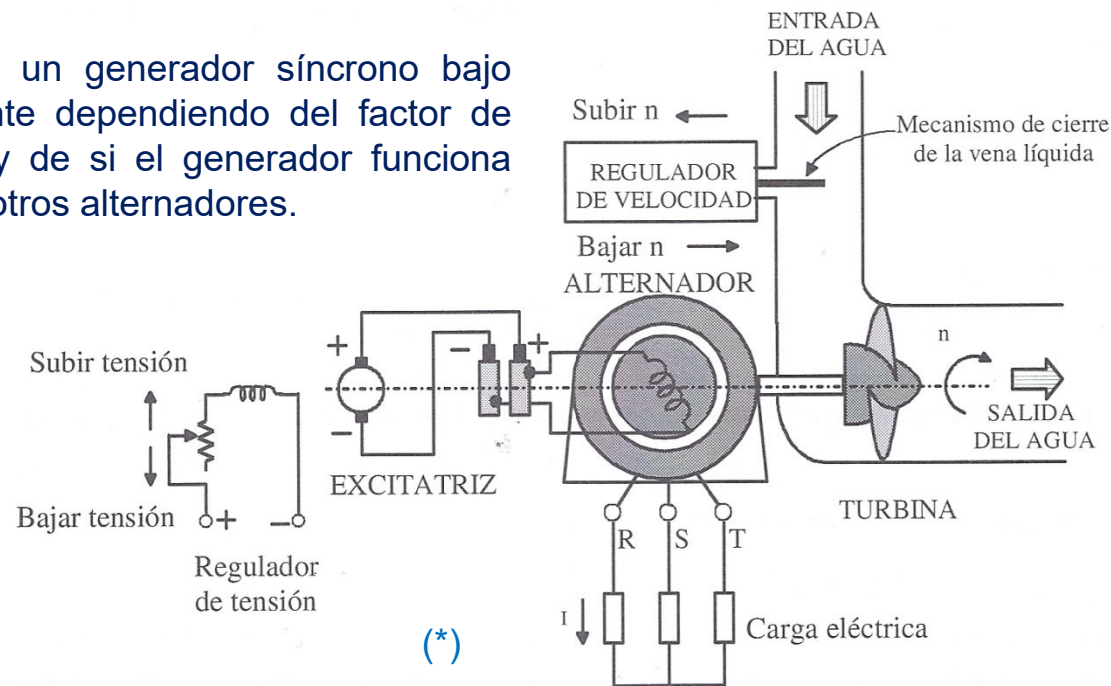
$$\mathbf{bc} = \frac{X_s U \sin \varphi}{U} = \mathbf{k Q}$$

$$\mathbf{ga} = X_S | = \mathbf{k}' |$$

$$\left. \begin{aligned} P &= U I \cos \varphi \\ X_S I \cos \varphi &= E_V \sin \delta \Rightarrow I \cos \varphi = \frac{E_V \sin \delta}{X_S} \end{aligned} \right\} \Rightarrow P = \frac{E_V U \sin \delta}{X_S} = P_{\max} \sin \delta$$

FUNCIONAMIENTO DE UN ALTERNADOR EN UNA RED AISLADA

El comportamiento de un generador síncrono bajo carga, varía fuertemente dependiendo del factor de potencia de la carga y de si el generador funciona solo o en paralelo con otros alternadores.



Esquema de funcionamiento de un alternador en una red aislada

En la figura se muestra el esquema simplificado de un alternador que funciona aisladamente y está alimentando a una carga trifásica equilibrada.

El alternador ha de llevar dos controles importantes:

Regulador de tensión, que varía la corriente de excitación y controla, al menos en parte, la tensión de salida.

Regulador de velocidad que actúa sobre la entrada de agua a la turbina permitiendo con ello controlar la velocidad del grupo y por consiguiente su frecuencia.

Funcionamiento del Alternador en una Red Aislada

Las consideraciones anteriores nos permiten hacer un estudio del funcionamiento del alternador según las diferentes cargas

- La frecuencia depende de la velocidad de la máquina motriz que mueve al alternador
- El f. d. p. del alternador es el f. d. p. de la carga
- La tensión de salida depende de:
 - a) De la velocidad de giro ($E = K\mathbf{N}\Phi$)
 - b) De la corriente de excitación ($E = K\mathbf{N}\Phi$)
 - c) De la corriente del inducido
 - d) Del f. d. p. de la carga

Ejemplo

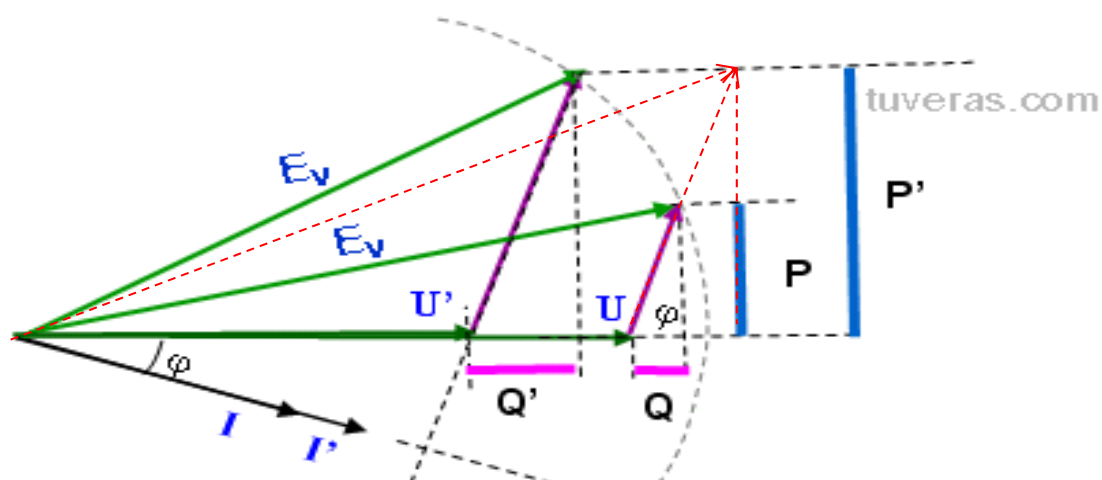
Supongamos que aumenta la carga del alternador sin variar el fdp.

Esto supone lo siguiente:

- La tensión en bornes tiende a disminuir pasando de U a U'
- La máquina motriz se verá sometida a un par resistente mayor, ($\Sigma P = C_R \omega \Rightarrow C_R = \Sigma P / \omega$) $P' > P$ con lo que disminuirá su velocidad, disminuyendo con ello la frecuencia del alternador.

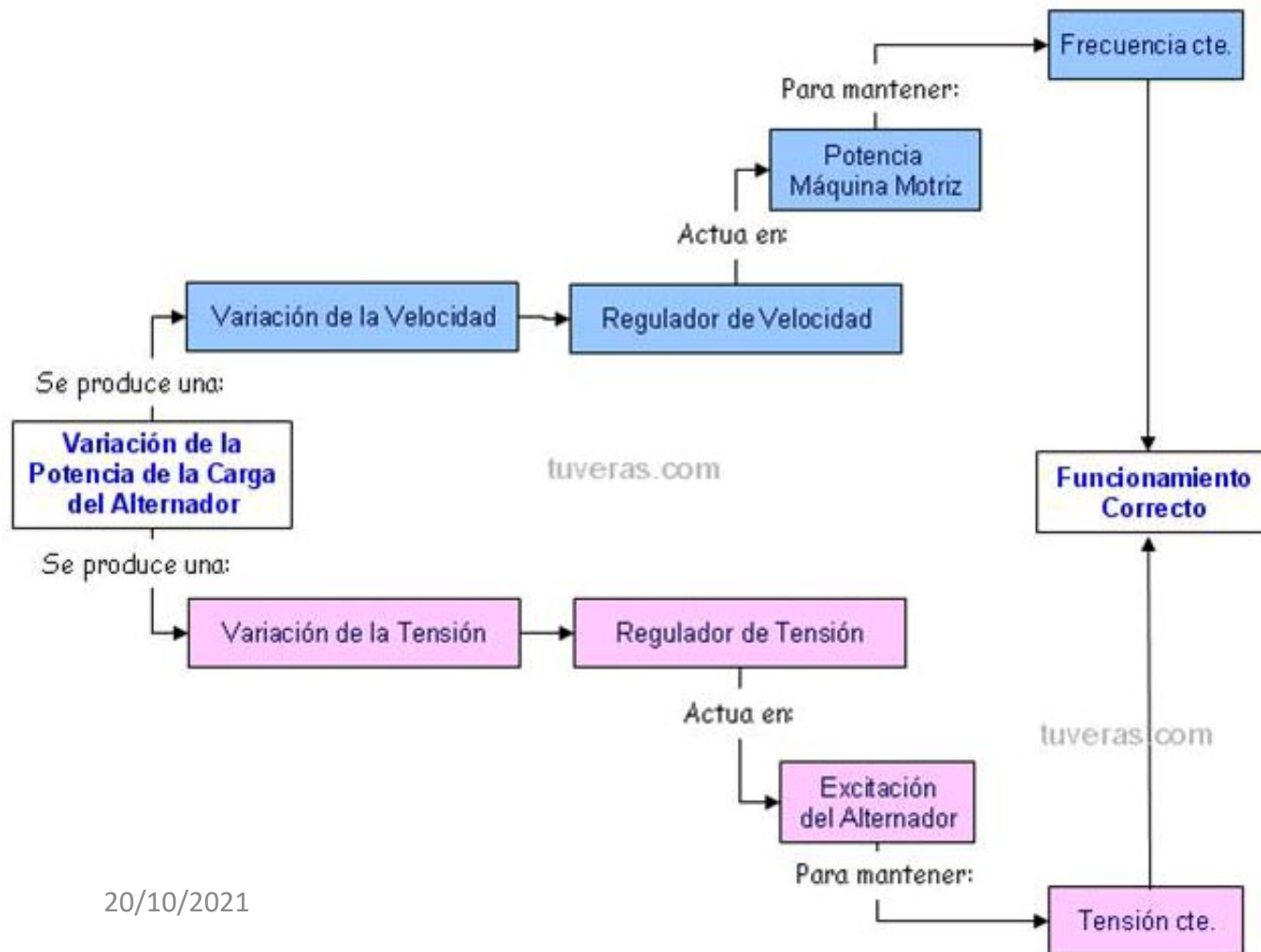
Entonces es necesario regular el alternador, actuando en:

- La excitación, para aumentar la fem, que permita a la U permanecer cte.
- La potencia de la máquina motriz, aumentando su potencia, y que impida disminuir la velocidad del sistema



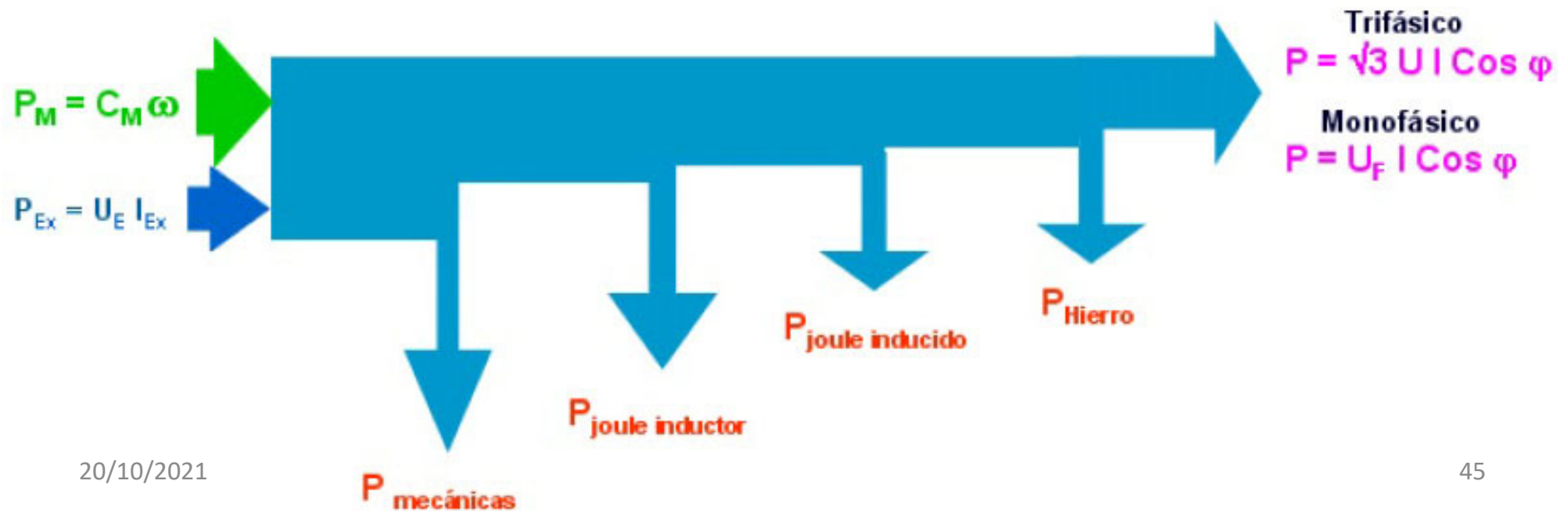
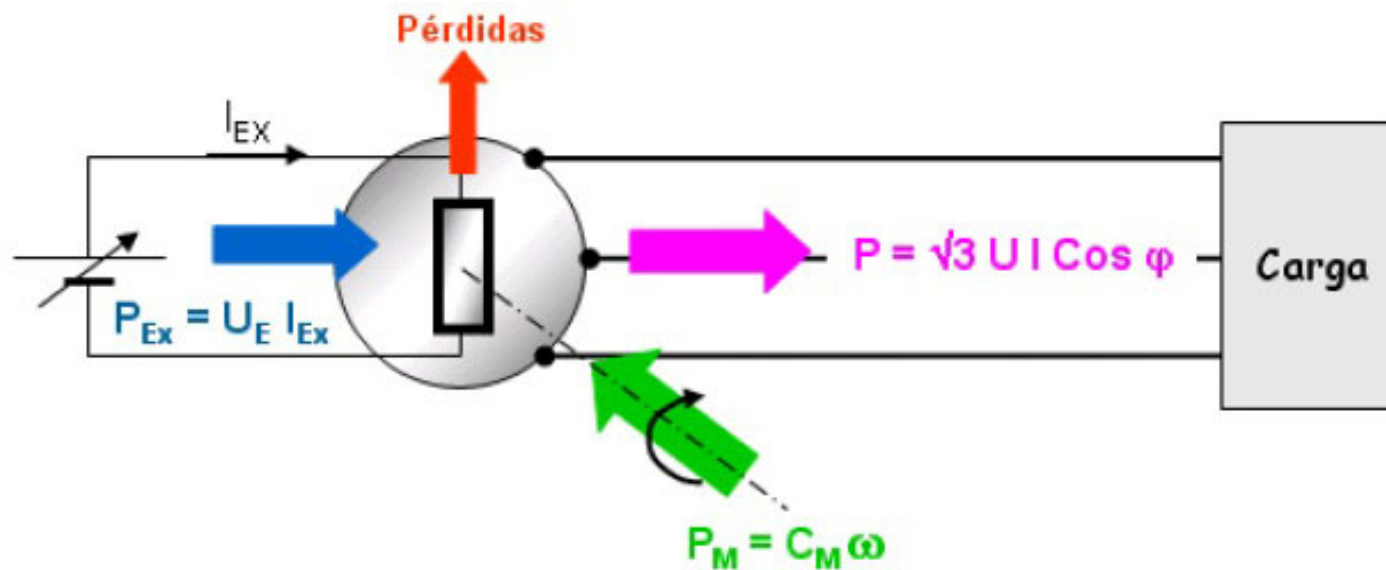
Regulación de los alternadores

Al producirse variaciones en la carga de un alternador, es necesario regular el sistema máquina motriz-alternador, actuando sobre la excitación del alternador, para mantener la tensión de la red constante y en la potencia de la máquina motriz, para mantener la velocidad y en consecuencia la frecuencia constante.



La regulación manual puede ser aceptable para pequeños grupos electrógenos, pero en general la regulación es automática, tanto en tensión como en frecuencia (velocidad).

BALANCE DE POTENCIAS. RENDIMIENTO



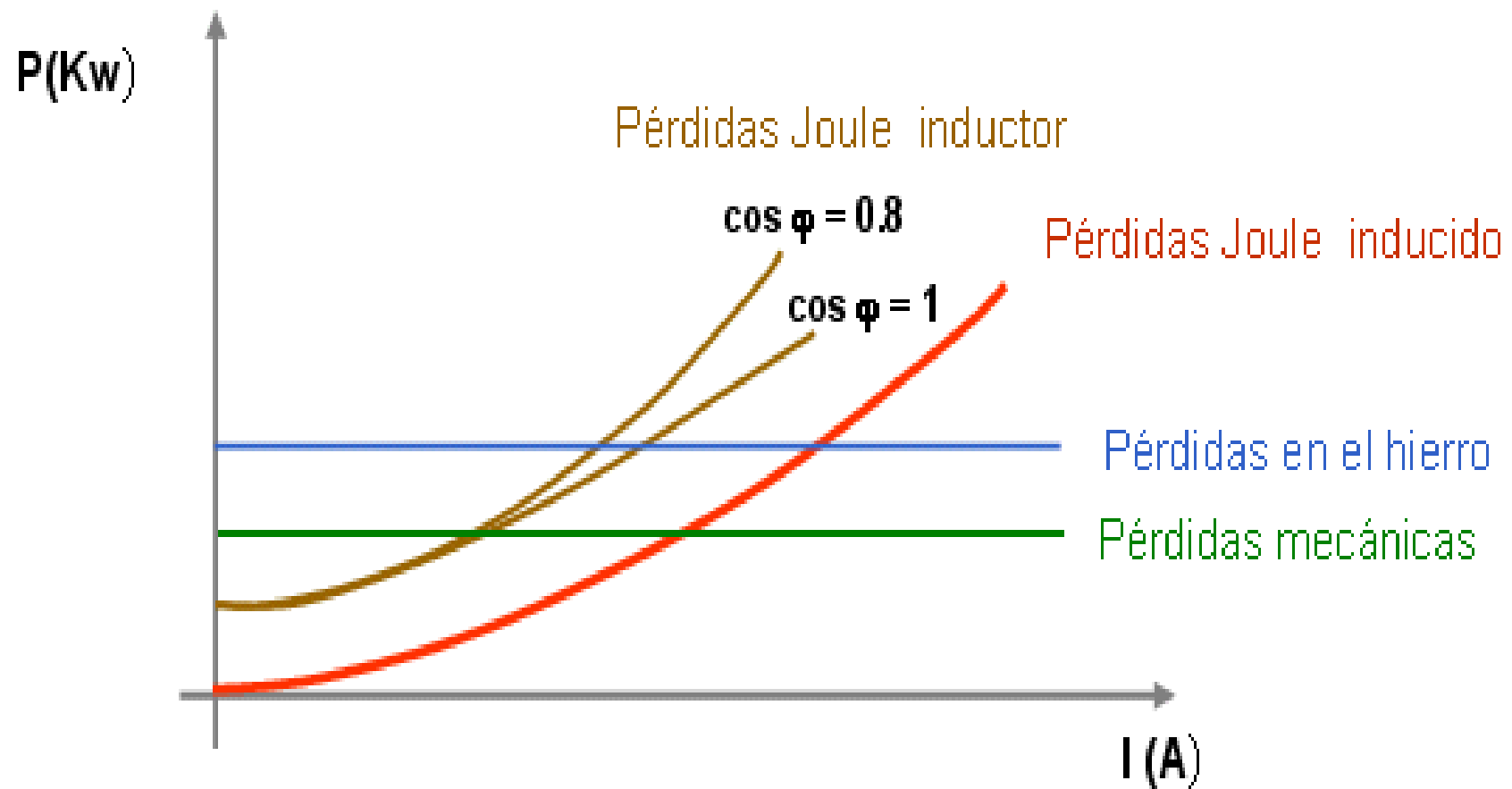
$$\eta = \frac{\text{Potencia de salida}}{\text{Potencia de entrada}} = \eta = \frac{P}{P_M + P_{Ex}} = \eta = \frac{P}{P + P_{\text{Pérdidas}}}$$

Si el alternador esta autoexcitado la potencia de entrada $P_{Ex} = 0$, pues es generada por P_M

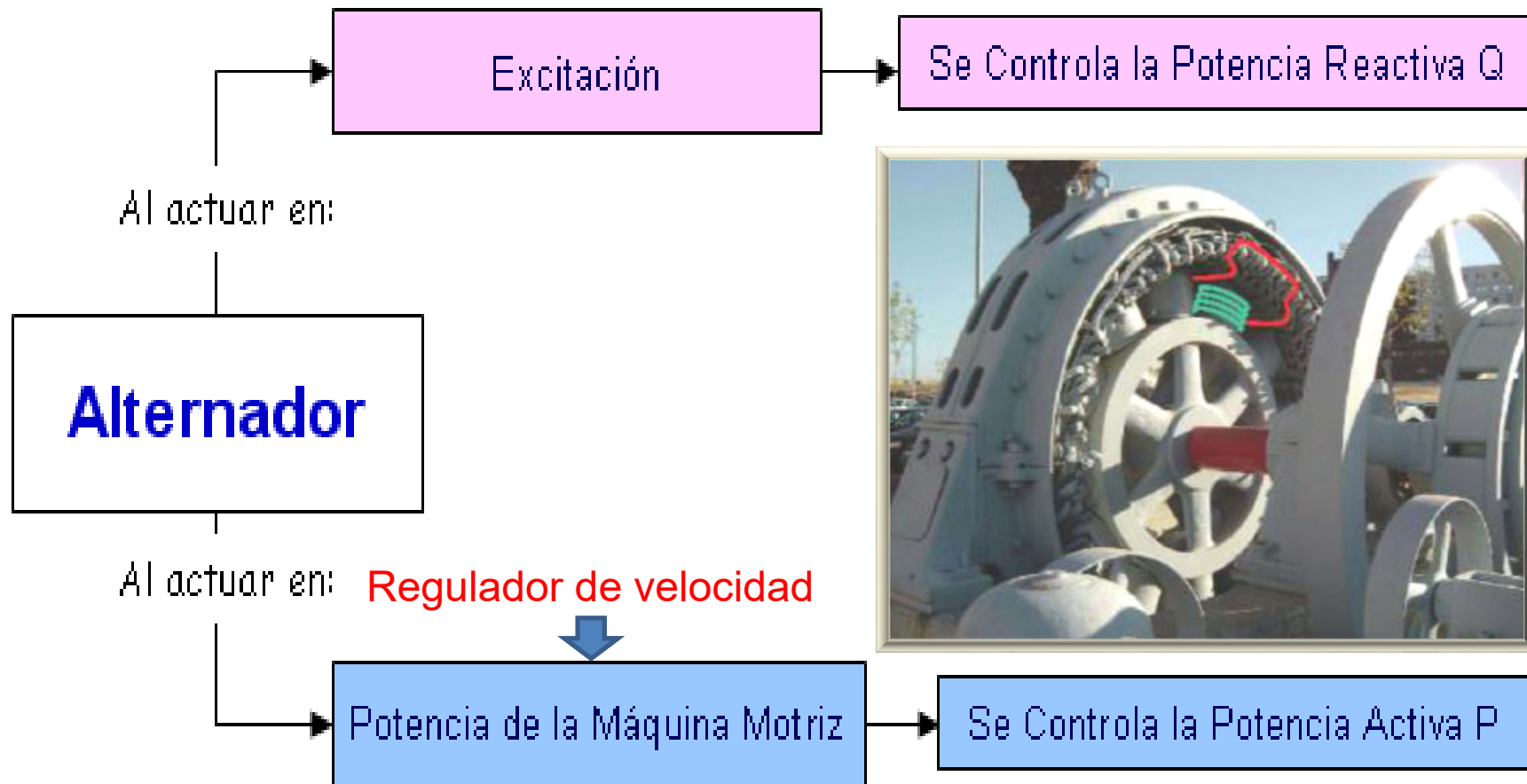
Pruebas para hallar las pérdidas

- Alternador no excitado girando a su velocidad nominal $\longrightarrow$ Pérdidas mecánicas
- Alternador excitado en vacío girando a su velocidad nominal $\longrightarrow$ Pérdidas mecánicas y en el hierro
- Mediante cálculo se obtienen las pérdidas por efecto Joule ($R I^2$) $\longrightarrow$ Pérdidas por efecto Joule

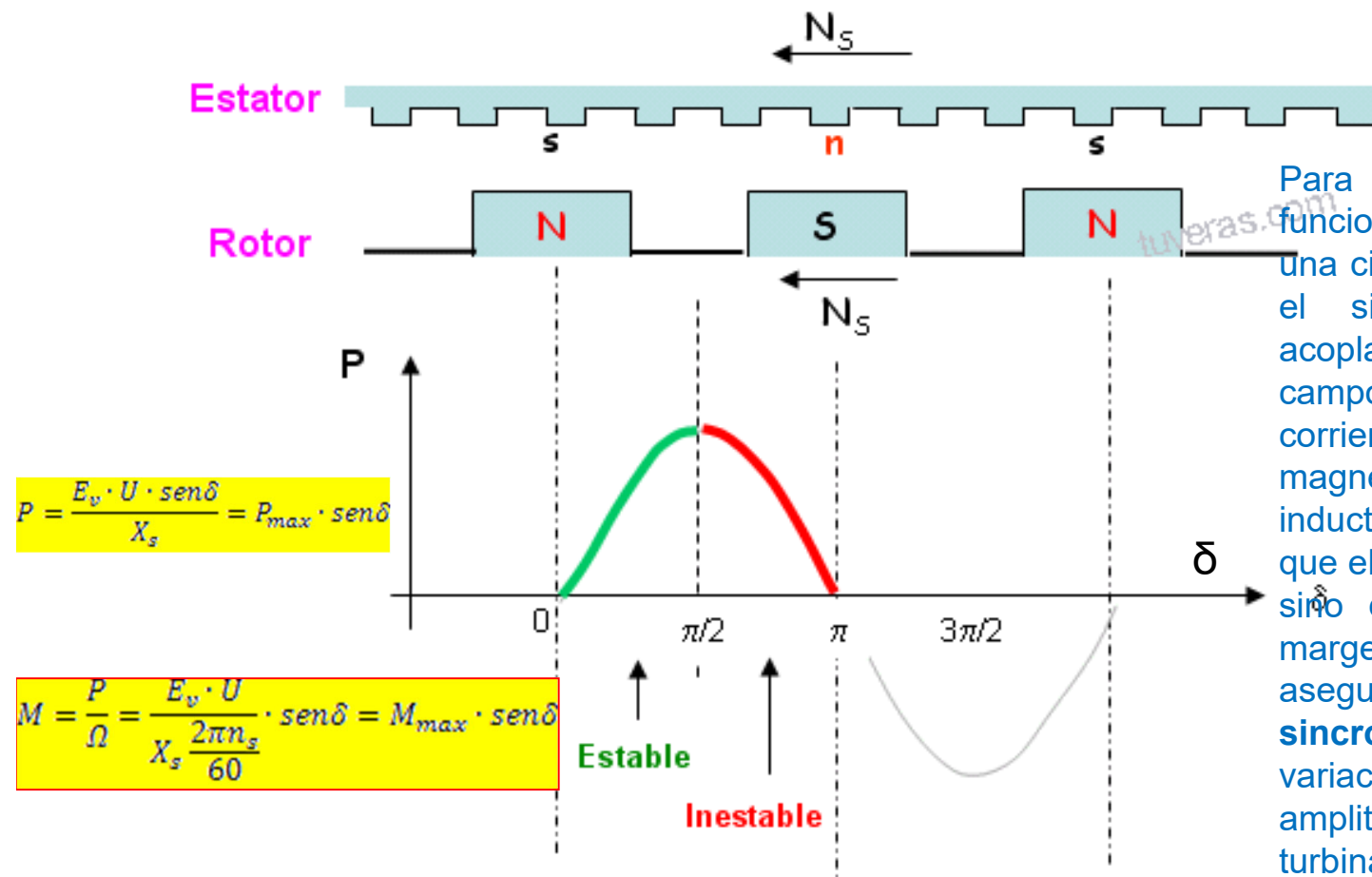
REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LAS PÉRDIDAS



FUNCIONAMIENTO DE UN ALTERNADOR CONECTADO A UNA RED DE POTENCIA INFINITA



Estabilidad del Alternador Acoplado



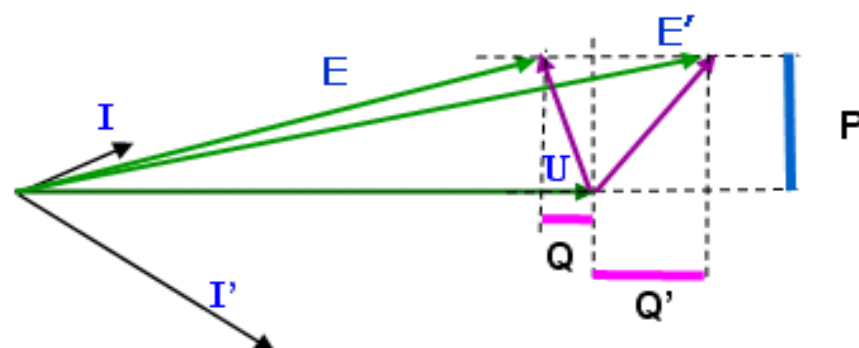
Para que la máquina, en funcionamiento normal, conserve una cierta capacidad de mantener el sincronismo, esto es, el acoplamiento magnético entre el campo giratorio producido por las corrientes del inducido y el campo magnético creado por los polos inductores, no sólo es necesario que el ángulo δ sea menor de $\pi/2$, sino que debe existir un cierto margen de estabilidad capaz de asegurar la existencia de **par sincronizante** incluso ante variaciones bruscas de cierta amplitud en el par mecánico de la turbina o en la tensión de la red

Hemos visto que en una máquina síncrona la curva del par tiene forma sinusoidal. Para la estabilidad del alternador se requiere que el desplazamiento polar sea inferior a $\pi/2$ (ángulo eléctrico). En este caso un adelanto de la rueda polar, desplazamiento de los polos reales hacia adelante, lleva consigo un aumento de su potencia activa, y por tanto, del par resistente ejercido sobre la máquina motriz (el alternador es frenado). *La marcha es estable*. Pero más allá del ángulo $\pi/2$, el adelanto de la rueda polar lleva consigo una disminución de la potencia activa suministrada, el adelanto sigue (el alternador se acelera). *La marcha es inestable*.

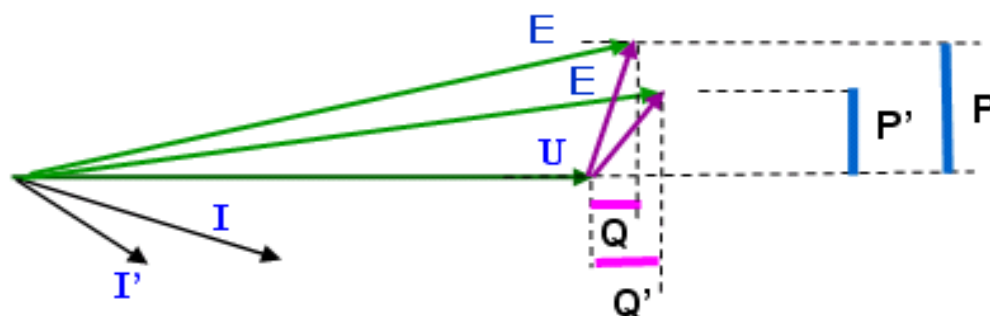
El Alternador Acoplado a una Red de Potencia Infinita

En este caso las variaciones que se realicen sobre el alternador no afectan en gran medida a las características del sistema, que es de potencia mucho mayor que un alternador.

Como la tensión de la red U permanece cte. al actuar sobre la excitación lo que se obtiene es un cambio en la potencia reactiva que el alternador entrega a la red, suministrando potencia reactiva (alternador sobreexcitado), o consumiendo potencia reactiva (alternador subexcitado)

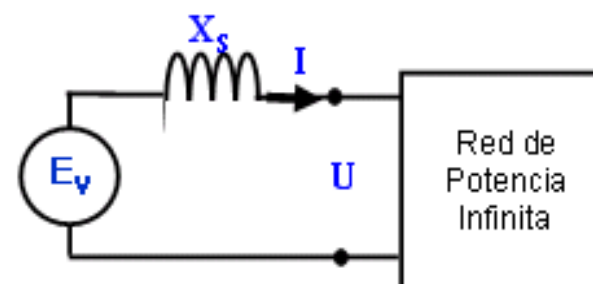
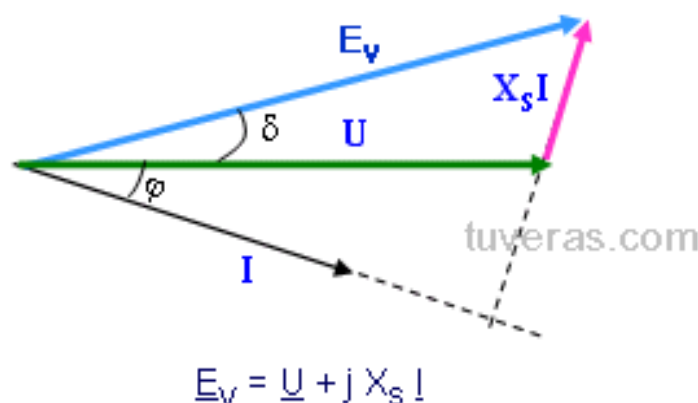


Actuando sobre la potencia de la máquina motriz, no se varía la frecuencia, que está fijada por la red, lo que se consigue es variar la potencia activa entregada por el alternador a la red



Funcionamiento de la Máquina Síncrona en una Red de Potencia Infinita

Potencia Activa y Reactiva Desarrollada



$$\underline{S} = \underline{U} \underline{I}^* = \underline{U} \underline{I} \cos \varphi + j \underline{U} \underline{I} \sin \varphi = P + j Q$$

($\underline{I}^*$ = conjugado de $\underline{I}$)

Según el esquema:

$$\begin{cases} \underline{E}_v = E_v \angle \delta = E_v \cos \delta + j E_v \sin \delta \\ \underline{U} = U \angle 0^\circ \end{cases}$$

$$\underline{I} = \frac{\underline{E}_v - \underline{U}}{j X_s} \Rightarrow \underline{I} = \frac{(E_v \cos \delta - U) + j E_v \sin \delta}{j X_s} \Rightarrow \underline{I}^* = \frac{(E_v \cos \delta - U) - j E_v \sin \delta}{-j X_s}$$

$$\underline{S} = \underline{U} \underline{I}^* \Rightarrow \underline{S} = U \frac{(E_v \cos \delta - U) - j E_v \sin \delta}{-j X_s}$$

Potencia activa y reactiva

Monofásicas

$$\vec{S} = \frac{UE_v \operatorname{sen} \delta}{X_s} + j \frac{U(E_v \cos \delta - U)}{X_s}$$

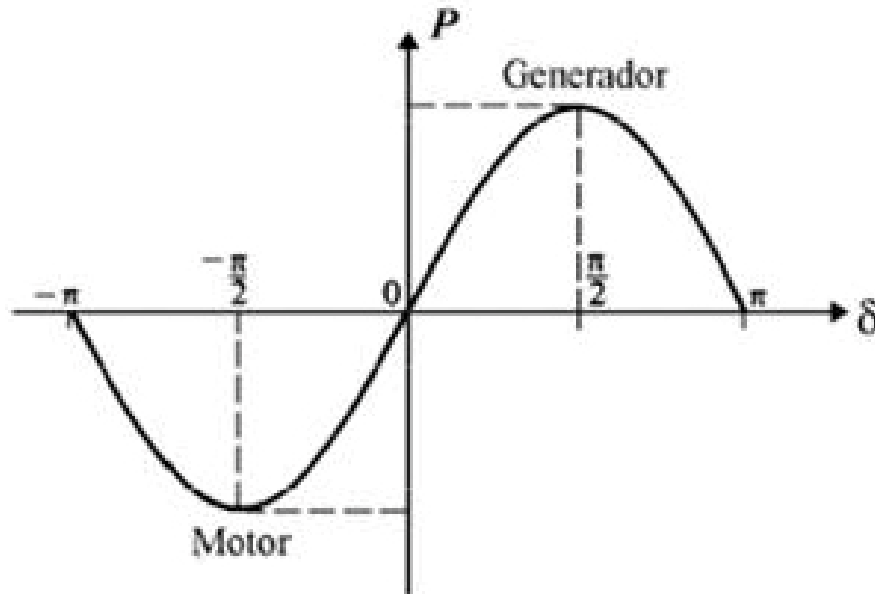
Para el caso trifásico habría que multiplicar por 3.

$$P = \frac{UE_v \operatorname{sen} \delta}{X_s} = P_{\max} \operatorname{sen} \delta$$

$$Q = \frac{U(E_v \cos \delta - U)}{X_s}$$

Trifásicas

Para determinar la potencia activa y reactiva trifásica habría que multiplicar por 3 cada una de las expresiones anteriores.



$$P = 3 \frac{E_v \cdot U}{X_s} \operatorname{sen} \delta$$

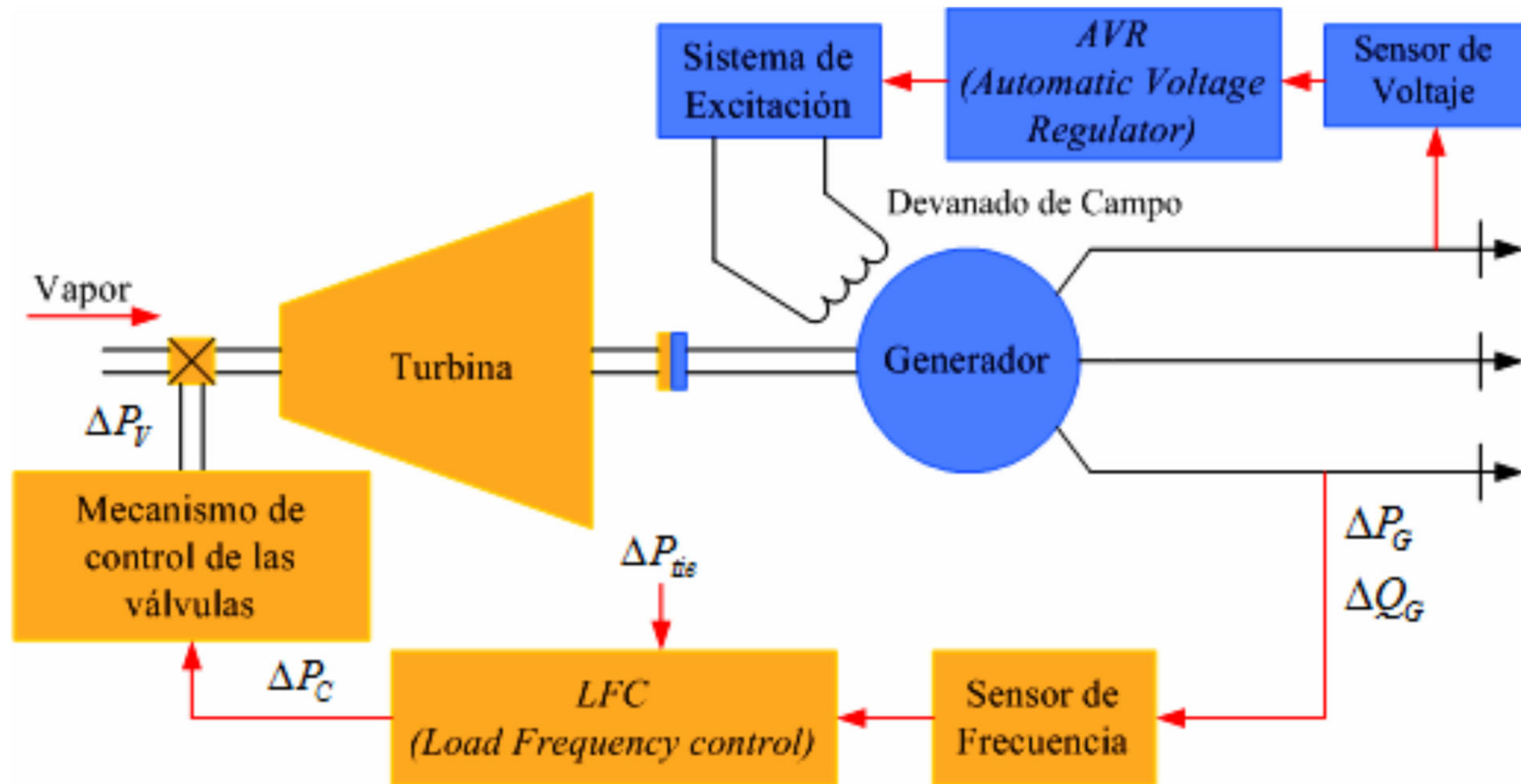
$$Q = \frac{3U}{X_s} (E_v \cos \delta - U)$$

Potencia activa y reactiva

CONCLUSIONES:

- ✦ Si $\delta > 0$ La potencia activa desarrollada por la máquina es positiva, se comporta como un generador
- ✦ Si $\delta < 0$ La potencia activa desarrollada por la máquina es negativa, se comporta como un motor
- ✦ La potencia máxima generada (o absorbida) por la máquina se produce para $\delta = 90^\circ$ éste ángulo de potencia representa el límite de estabilidad permanente de la máquina.
- ✦ Si se cumple que $E_v \cos \delta > U$ la máquina síncrona entrega potencia reactiva inductiva a la red (= la máquina recibe potencia capacitiva de la red). Se dice que la máquina está sobreexcitada
- ✦ Si se cumple que $E_v \cos \delta < U$ la máquina síncrona entrega potencia reactiva capacitiva a la red (= la máquina recibe potencia inductiva de la red). Se dice que la máquina está subexcitada

Alternadores síncronos acoplados



Esquema de un generador síncrono con una turbina de vapor

El control se realiza de dos maneras diferenciadas, por un lado el control frecuencia-potencia activa y por otro lado el de potencia reactiva-tensión, aprovechando el débil acoplamiento entre ambos lazos de control, lo que permite tratarlos como independientes.

ACOPLAMIENTO DE MÁQUINAS SÍNCRONAS

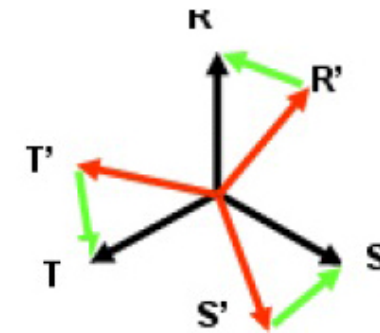
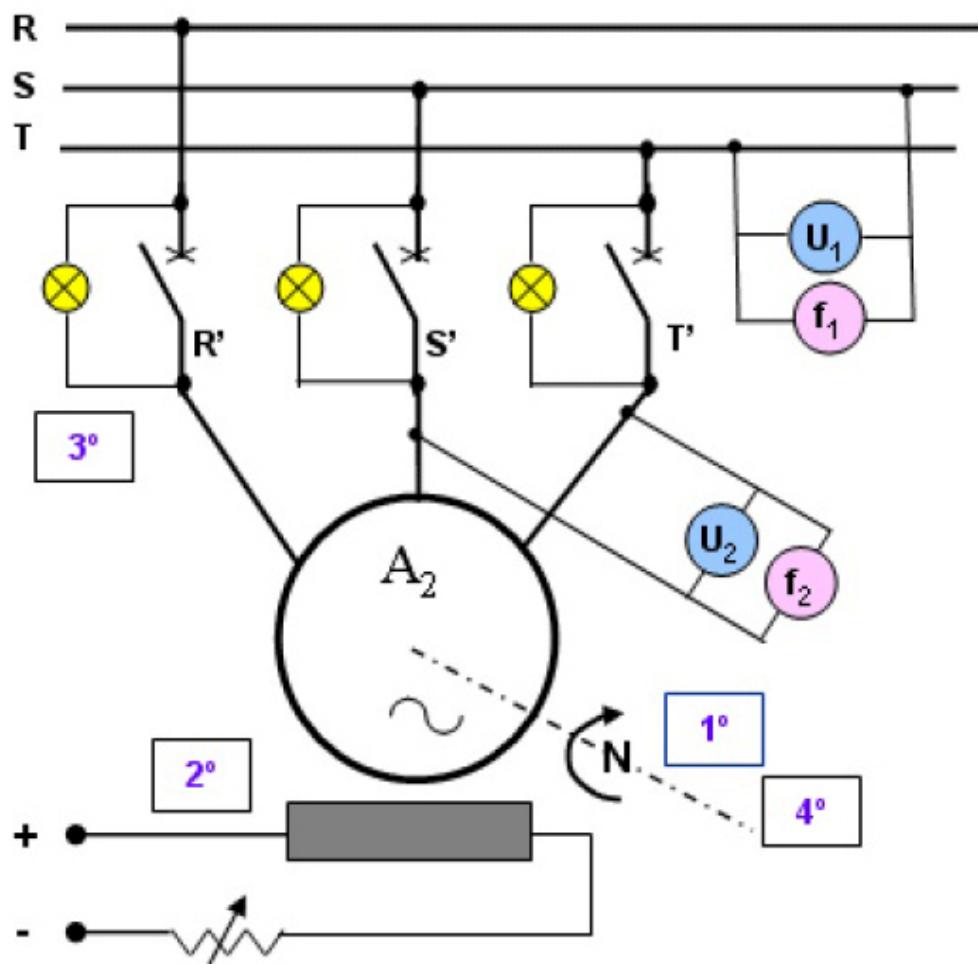
La conexión en paralelo de un alternador a la red implica una serie de operaciones complejas que constituyen la llamada **sincronización** de la máquina.

Para el acoplamiento de alternadores, o el acoplamiento de un alternador a una red, han de cumplirse las siguientes condiciones:

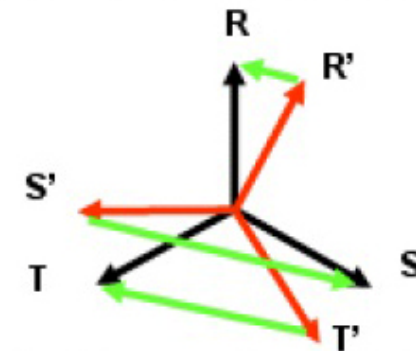
- 1º.- Igualdad de frecuencias**
- 2º.- Igualdad de tensiones**
- 3º.- Identidad de sus fases**
- 4º.- Igualdad de la secuencia del orden de las fases**

En las centrales automáticas o con telemando, el acoplamiento se hace automáticamente con la ayuda de dispositivos electrónicos.

ACOPLAMIENTO DE MÁQUINAS SÍNCRONAS



Existe igualdad de secuencias en el orden de las fases.
Las lámparas brillan simultáneamente



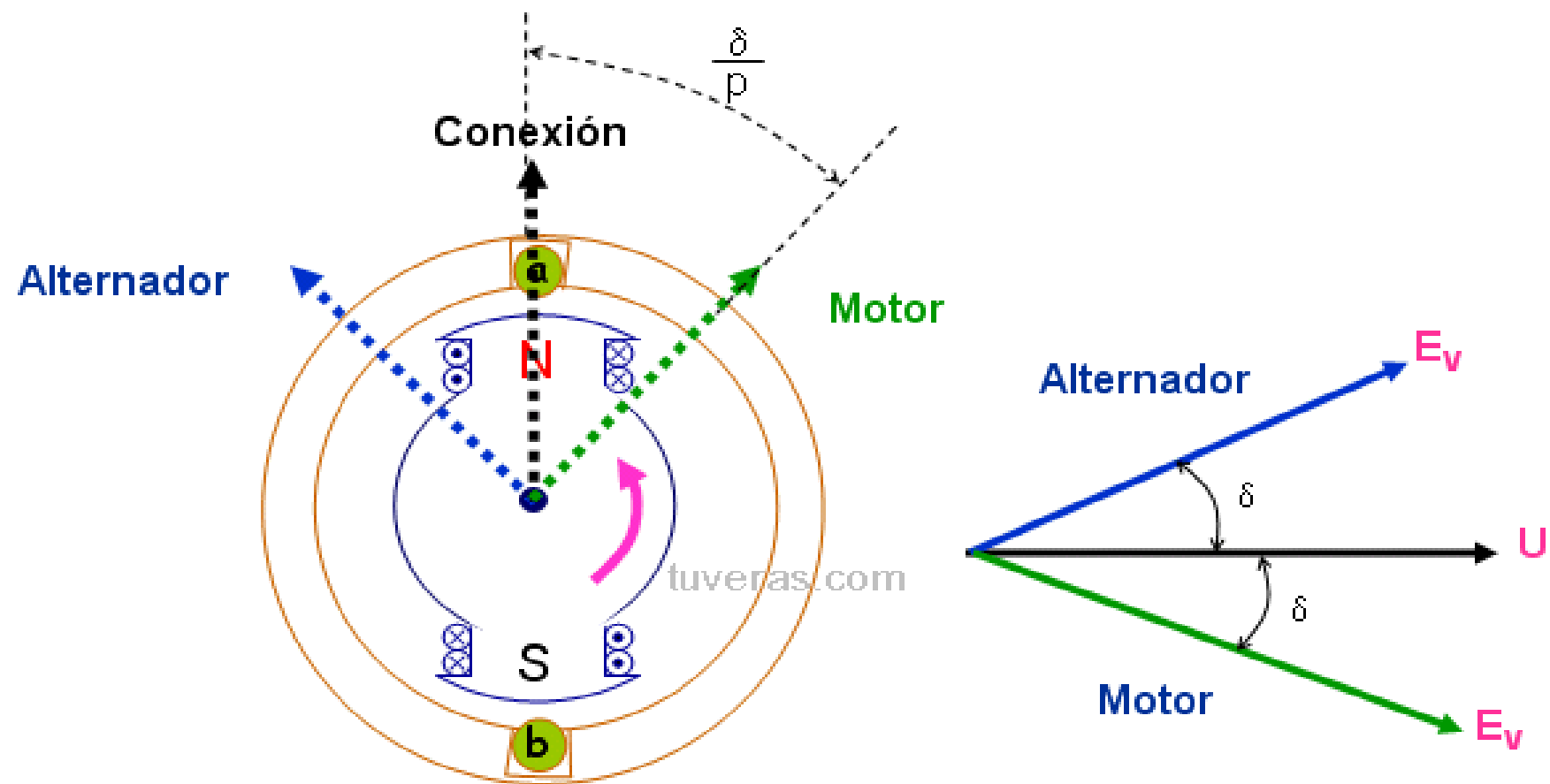
No existe igualdad de secuencias en el orden de las fases.
Las lámparas No brillan simultáneamente

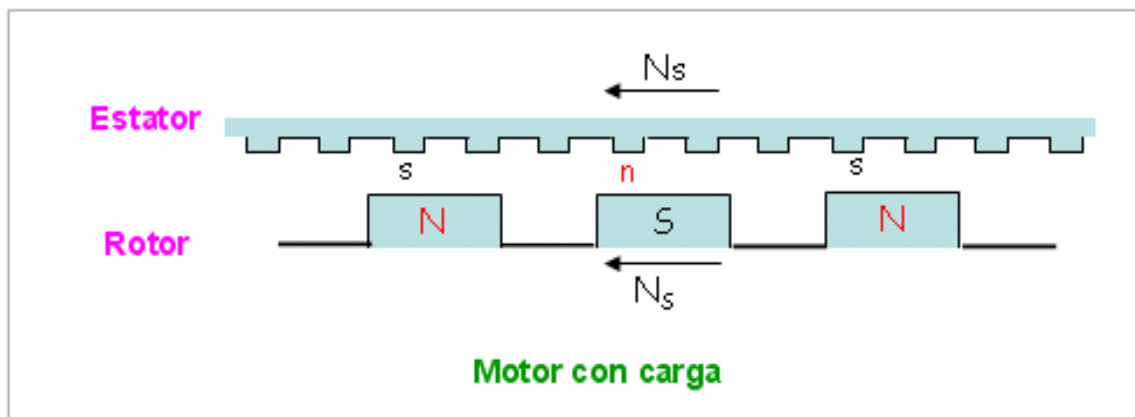
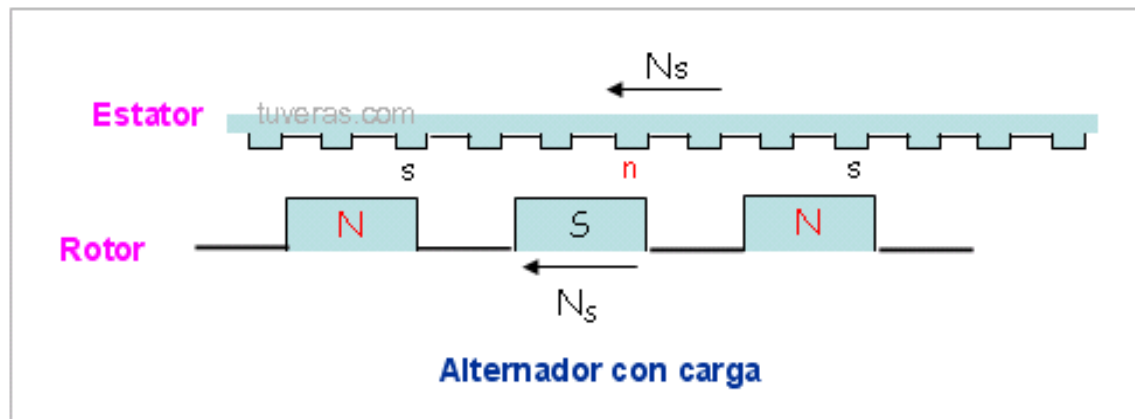
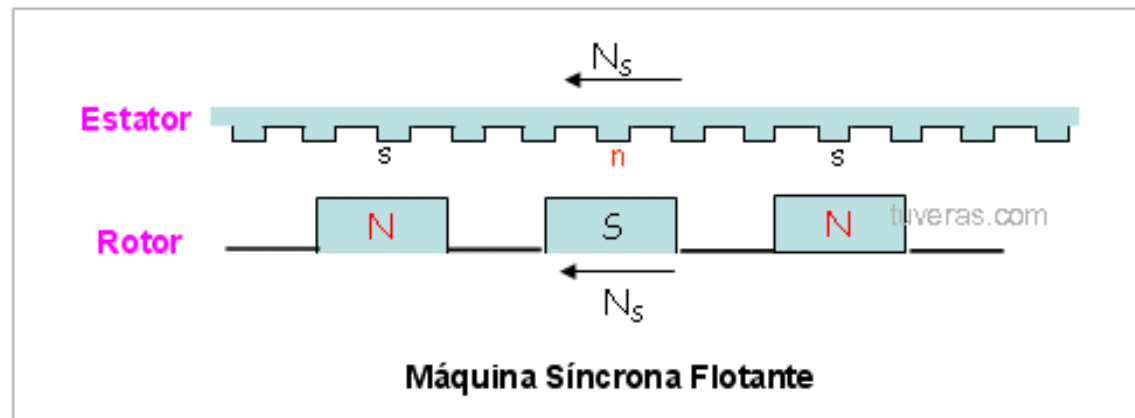
Esquema de acoplamiento de una máquina síncrona a la red mediante un sincronoscopio de tres lámparas incandescentes.

Acoplamiento de máquinas síncronas

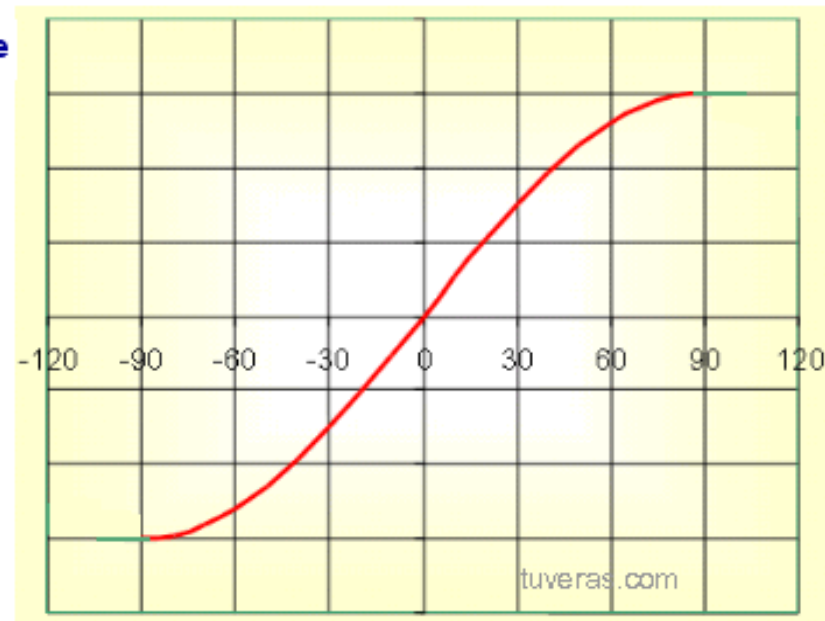
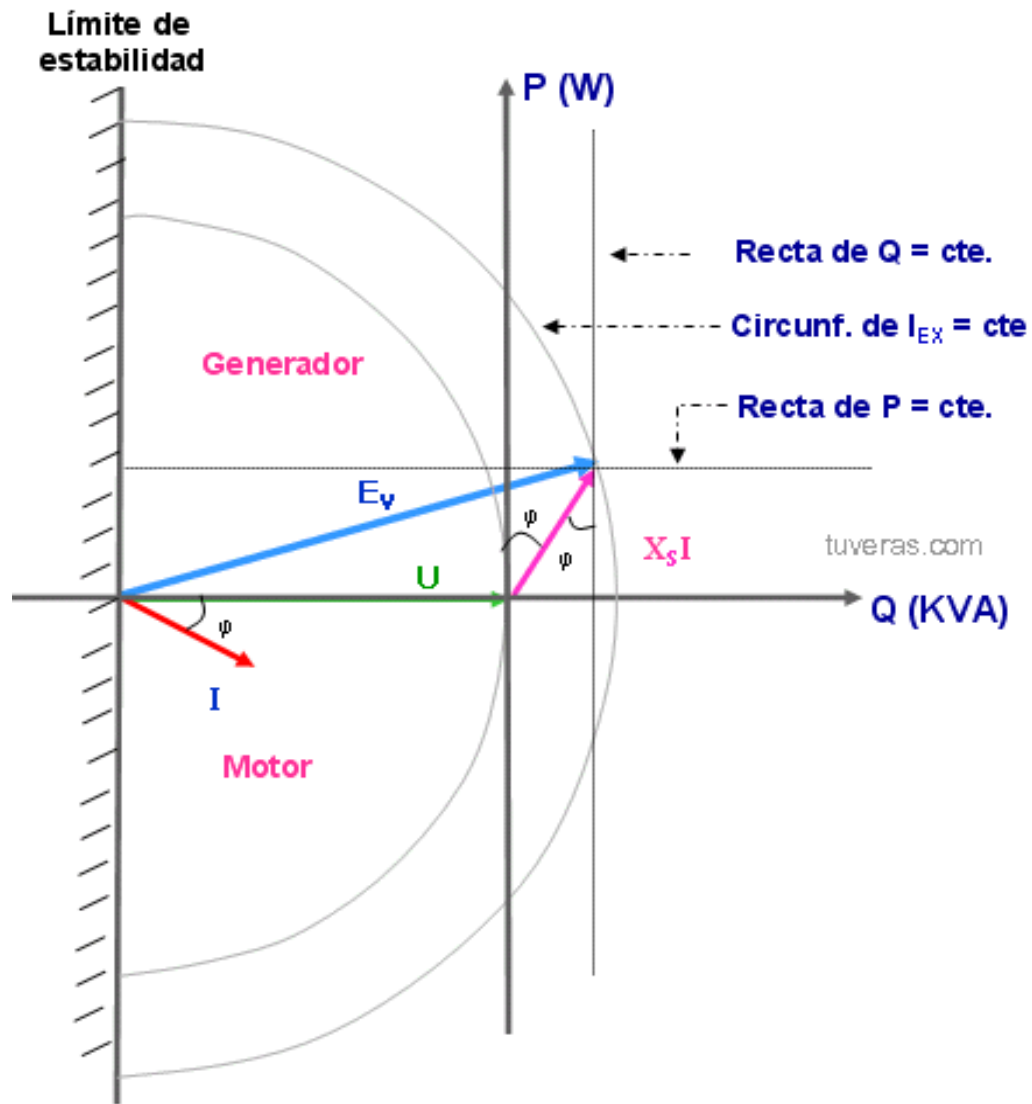
- 1º Se lleva la máquina A_2 hasta una velocidad próxima a la de sincronismo $N = \frac{60 \cdot f}{p}$
- 2º Se excita la máquina A_2 de forma que el voltímetro U_2 indique el mismo valor que el voltímetro U_1
- 3º Se comprueba que las lámparas se encienden y apagan simultáneamente (máximos y mínimos simultáneos). Si presentan luces giratorias es preciso cruzar dos conexiones.
- 4º Actuamos sobre la velocidad de A_2 , para ir reduciendo el parpadeo. Se cierra el interruptor de acoplamiento cuando el apagado de las lámparas dure unos 3 segundos.

Ángulo δ en un alternador y en un motor

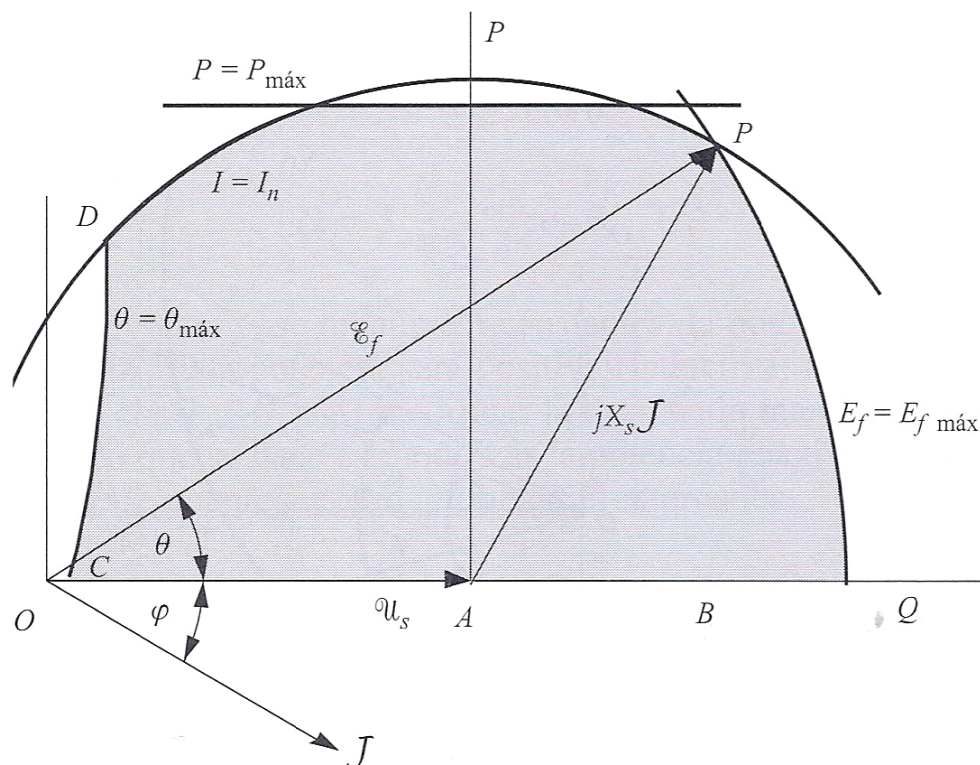




Estabilidad de funcionamiento



LÍMITES DE FUNCIONAMIENTO DEL ALTERNADOR



Límites de funcionamiento del alternador acoplado a una red de potencia infinita

El límite estático de estabilidad para la máquina de rotor liso viene fijado para un ángulo de carga igual a $\pi/2$, momento a partir del cual el **par sincronizante** se hace negativo. En este punto se tendría la potencia máxima que teóricamente podría ceder la máquina. Si representamos de nuevo el diagrama fasorial del alternador, de acuerdo con las ecuaciones:

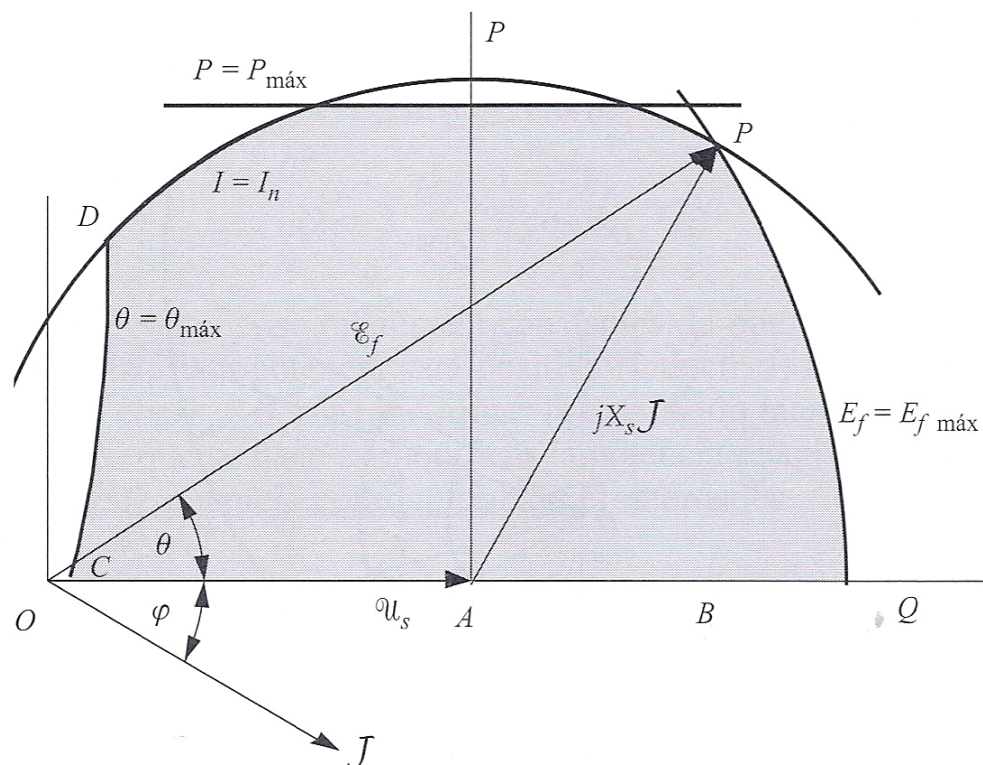
$$P = 3 \frac{E_f U_s}{X_s} \sin \theta \quad Q = 3 \frac{U_s}{X_s} (E_f \cos \theta - U_s)$$

Los ejes de potencia activa y reactiva se representan en la figura. Sobre dicha figura, tomando como base el punto de funcionamiento P, se pueden establecer los siguientes límites de funcionamiento:

1. Un primer límite dado por la máxima intensidad del inducido, I_n . Como X_s es constante, este límite se puede representar por una circunferencia de radio igual a $X_s I_n$, con centro en A. Se trata de un límite térmico fijado por la máxima capacidad de evacuar el calor generado por las pérdidas por efecto Joule en el devanado del inducido.

20/10/2021

LÍMITES DE FUNCIONAMIENTO DEL ALTERNADOR

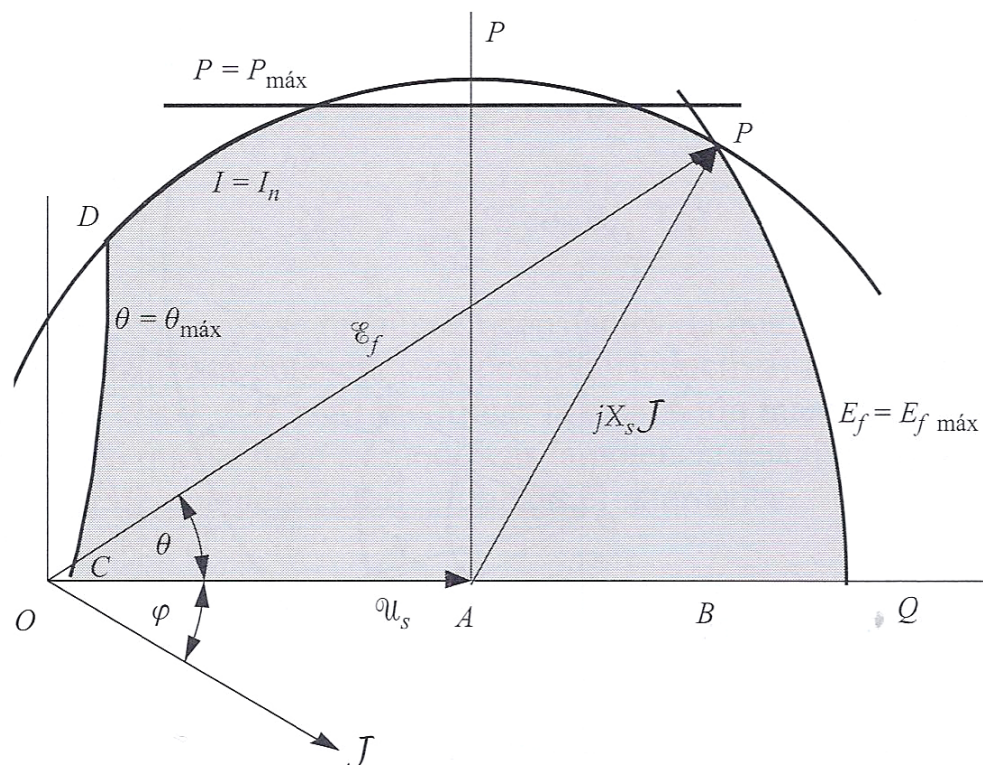


Límites de funcionamiento del alternador acoplado a una red de potencia infinita

2. Un segundo límite, también de origen térmico, dado por la máxima intensidad de excitación en el devanado inductor. A dicho valor le corresponde igualmente un valor máximo de la f.e.m. En vacío E_f , que se puede representar por una circunferencia de radio máximo $E_{f \text{ máx}}$ y con centro en O .

3.- Un tercer límite impuesto por la máxima potencia de la turbina. Si despreciamos a estos efectos la resistencia del inducido, esta potencia máxima se representa por una recta paralela al fasor U_s trazada a una distancia igual a $P_{\text{máx}}$. Se trata de un límite mecánico, que depende de variables no eléctricas y que tampoco es estrictamente constante.

LÍMITES DE FUNCIONAMIENTO DEL ALTERNADOR

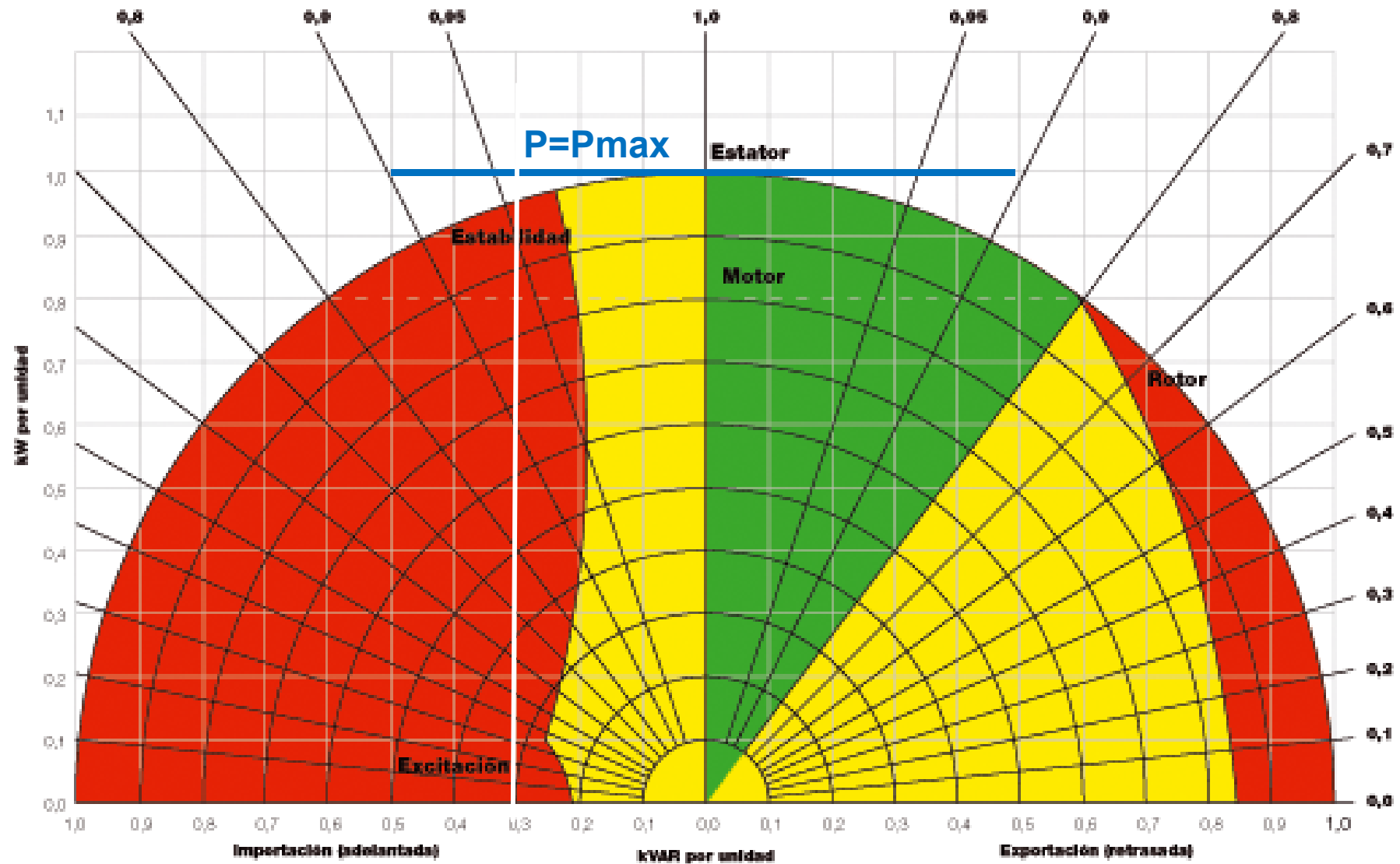


Límites de funcionamiento del alternador acoplado a una red de potencia infinita

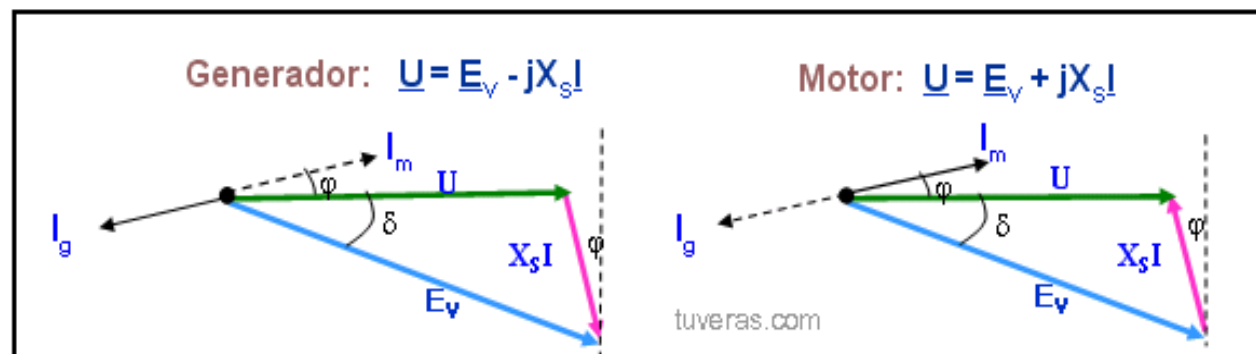
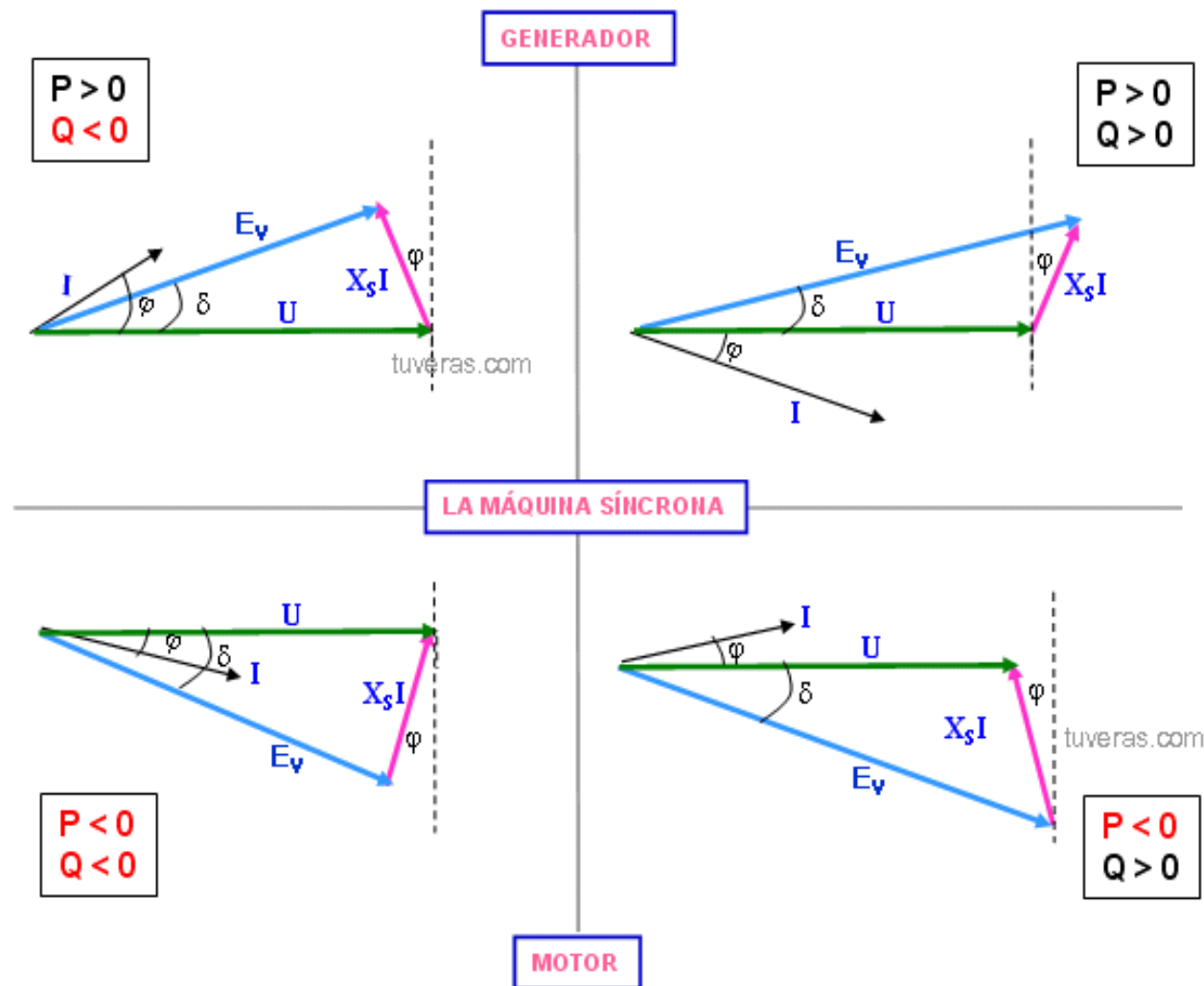
4. Un límite impuesto por el criterio de estabilidad estático. Estrictamente hablando dicho límite debería ser la recta vertical que pasa por el punto O, pero se suele establecer un ángulo menor de 90° , tal que se conserve siempre un margen mínimo de unos 10% de la potencia asignada a la máquina para cualquier valor de la intensidad de excitación. El resultado es la curva CD representada en la figura.

Cuando se tienen en cuenta todos estos límites el área de los posibles puntos de trabajo queda limitada a la zona sombreada de la figura.

LÍMITES DE FUNCIONAMIENTO DEL ALTERNADOR



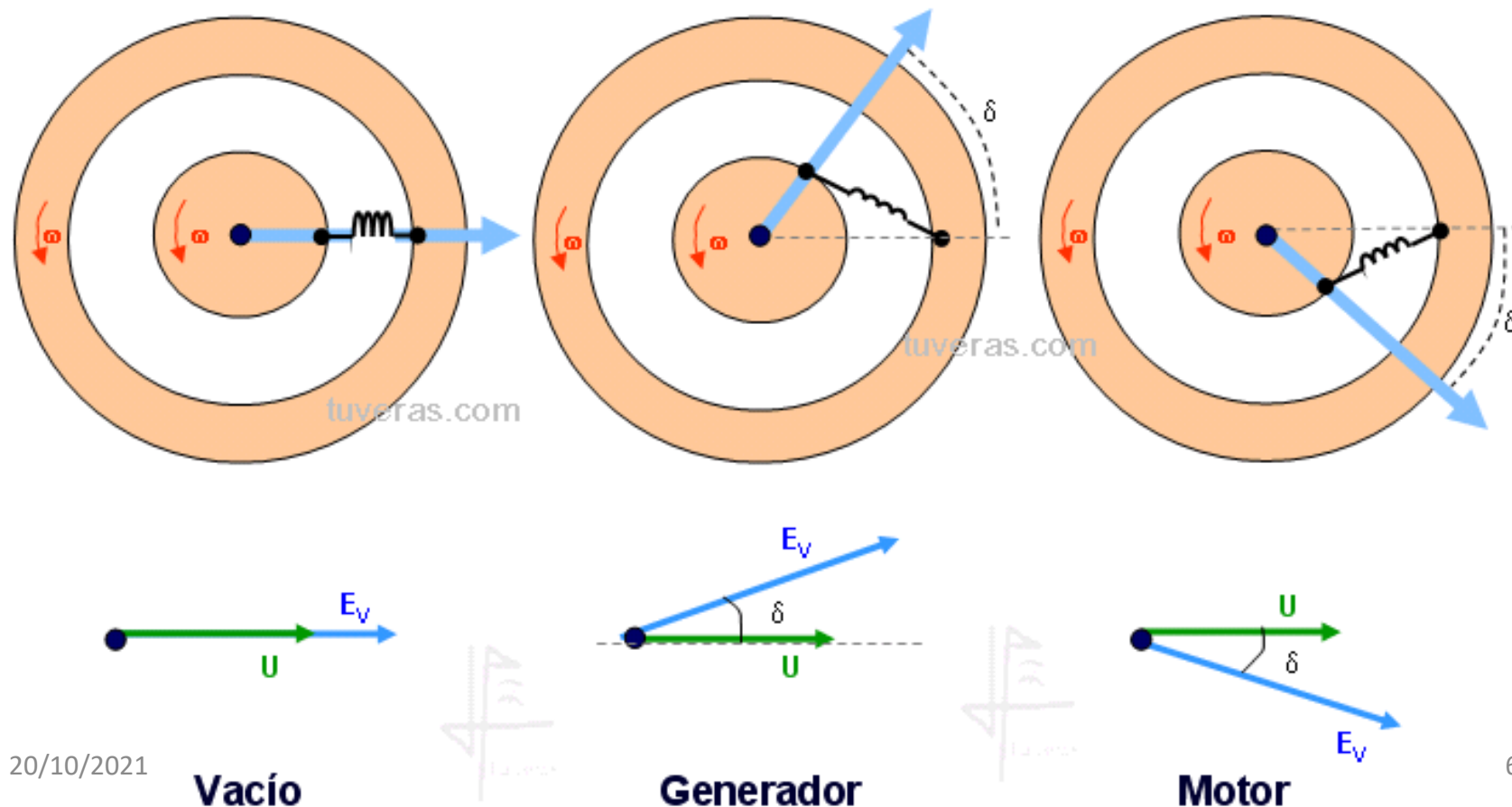
El área verde es el rango normal de funcionamiento de una máquina síncrona típica, el amarillo es anormal pero no perjudicial, y la operación en la región roja causará daño o mal funcionamiento



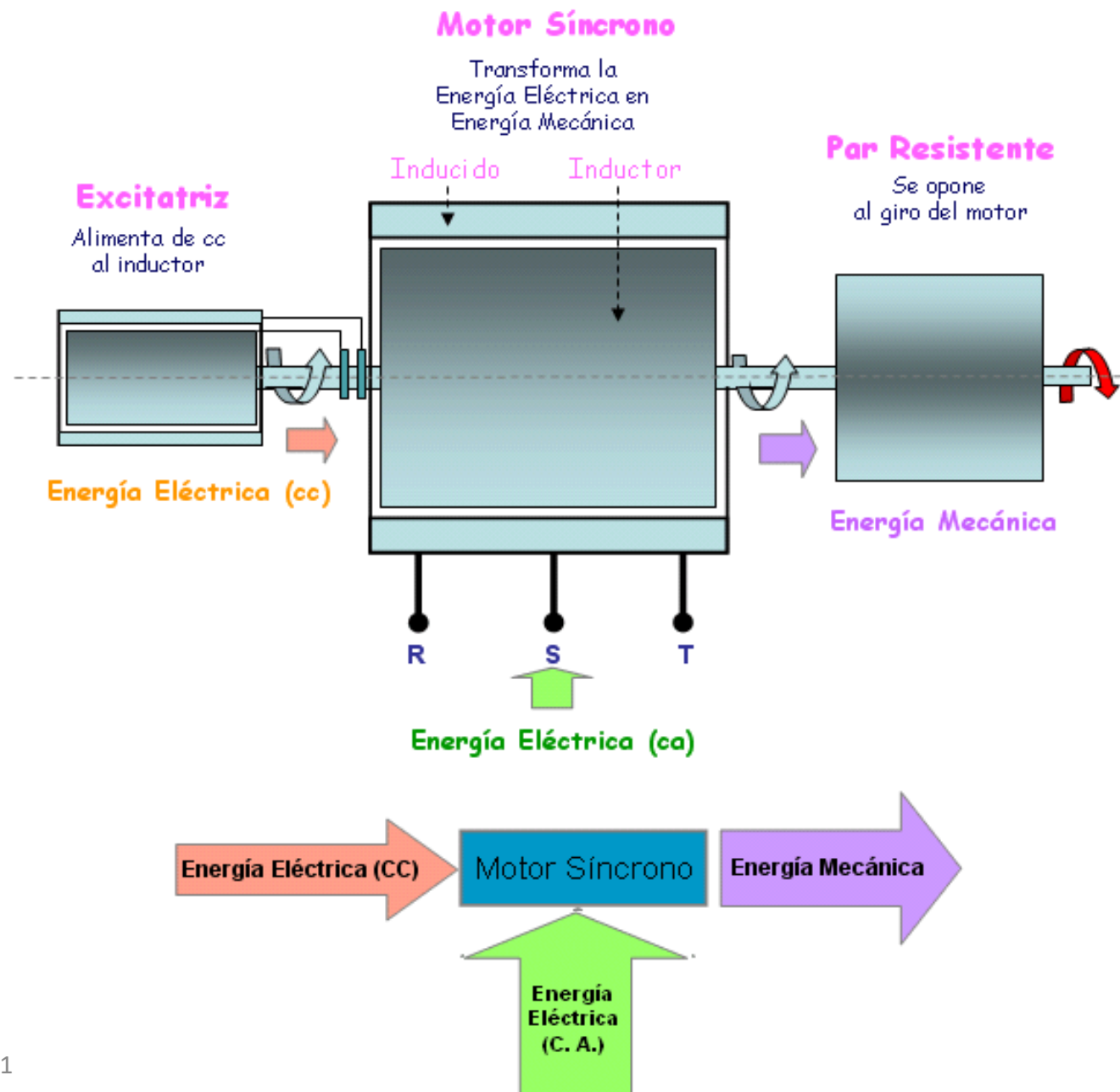
Analogía Mecánica de la Máquina Síncrona

Veamos una analogía mecánica de la máquina síncrona. Comparemos la máquina síncrona con dos poleas que pueden girar unidas por un muelle, representando la polea interior el rotor y la exterior el estator. Ambas poleas giran a la velocidad ω .

- En vacío el muelle no trabaja y no se transmite potencia de una polea a otra, E_v y U están alineados.
- En el símil del alternador la polea interior arrastra, a través del muelle, a la polea exterior, E_v adelanta un ángulo δ a U
- En el símil del motor la exterior arrastra, a través del muelle, a la polea interior, U adelanta un ángulo δ a E_v
- En ambos casos cuanto mayor es δ mayor es la potencia entregada o recibida



El Motor Síncrono

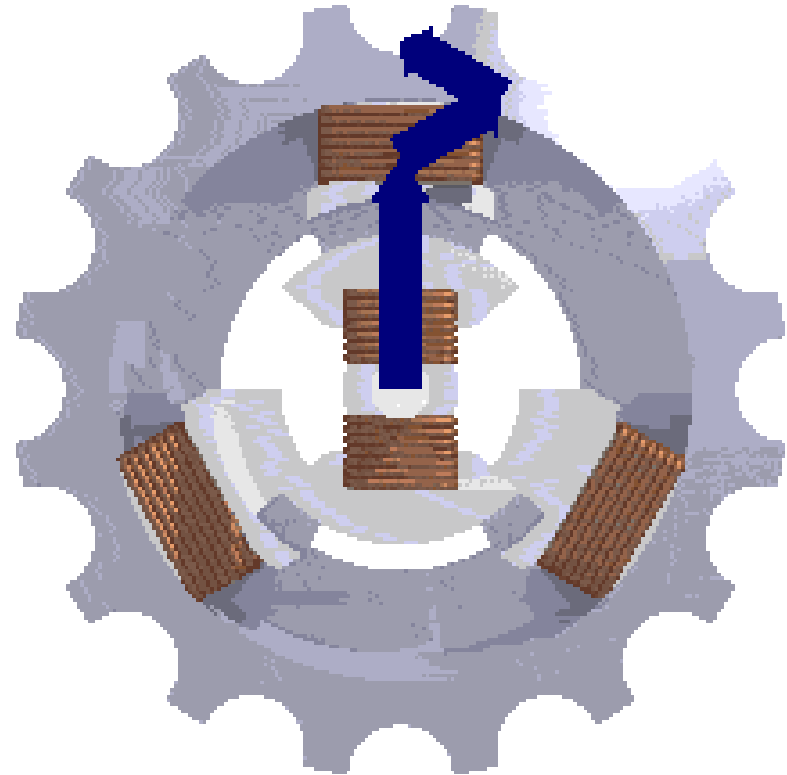


MOTOR SÍNCRONO

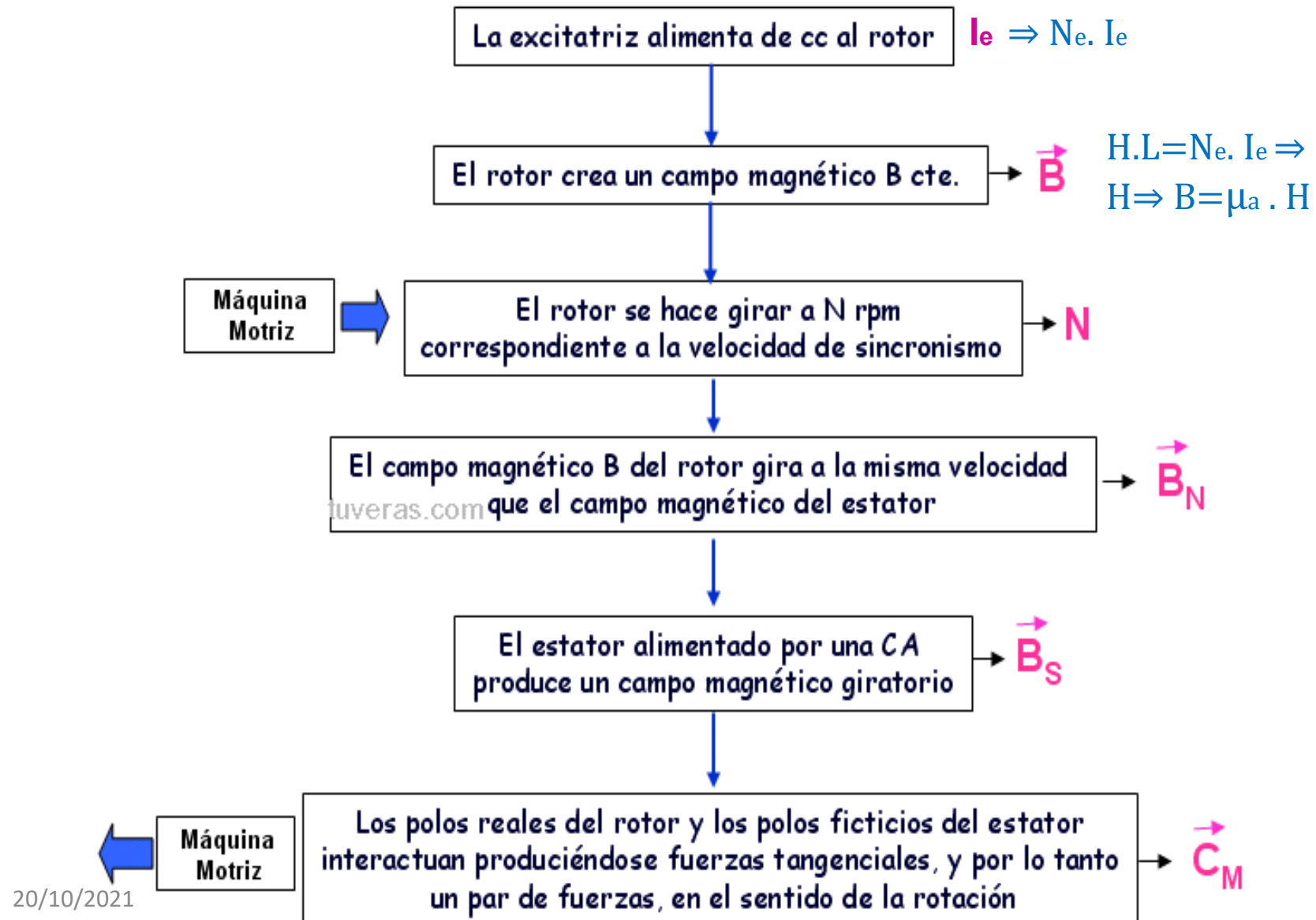
Los **motores síncronos** son un tipo de motores de corriente alterna . Su velocidad de giro (**n_r**) es constante y depende de la frecuencia (**f_1**) de la tensión de la red eléctrica a la que esté conectado y del número de pares de polos (**p**) del motor, siendo conocida esa velocidad como "**velocidad de sincronismo**".

La expresión matemática que relaciona la velocidad de la máquina con los parámetros mencionados es:

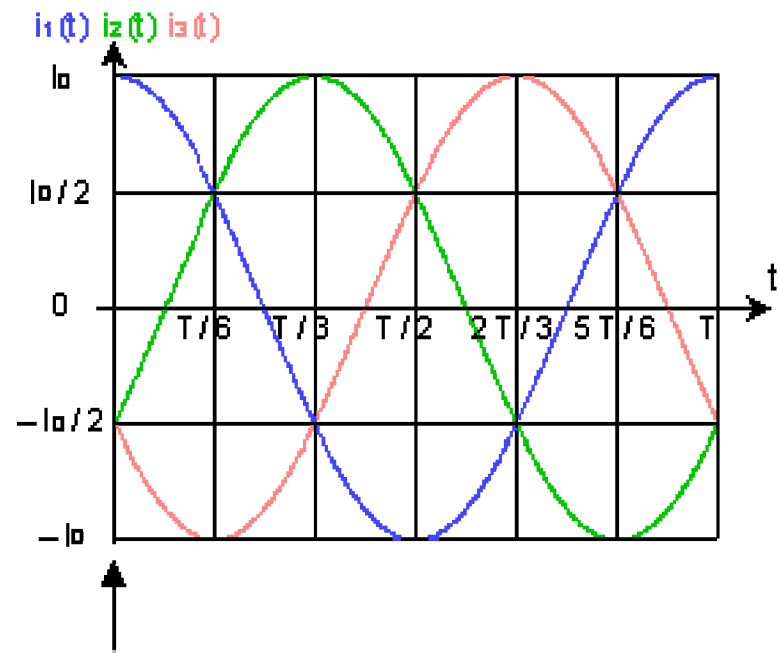
$$n_r = n_s = \frac{60 \cdot f_1}{p}$$



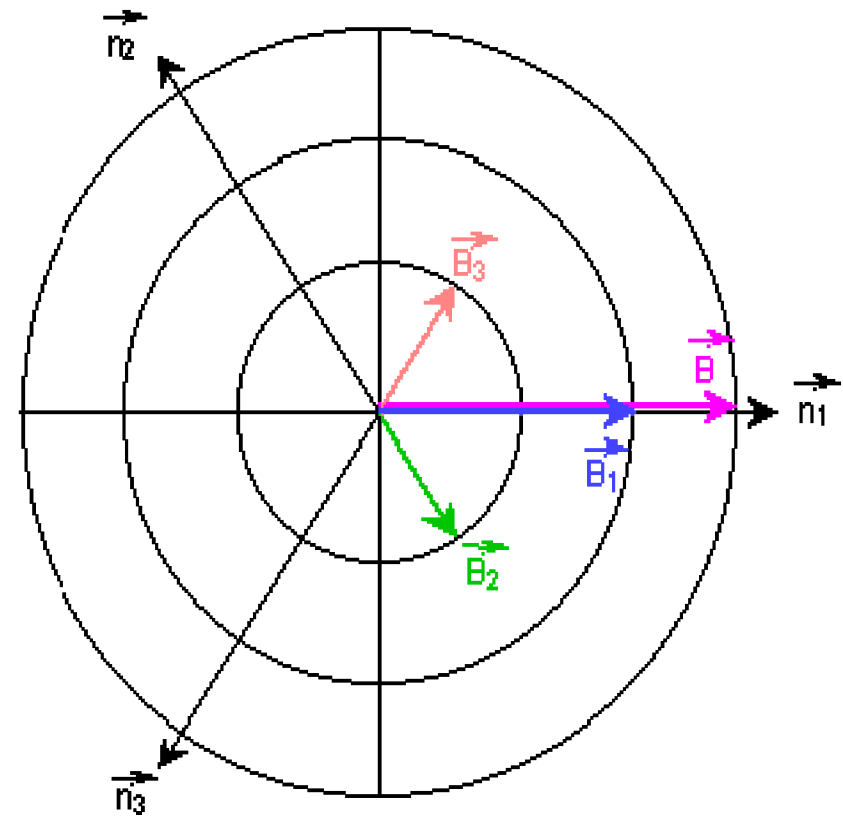
Principio de Funcionamiento



Campo magnético del estator

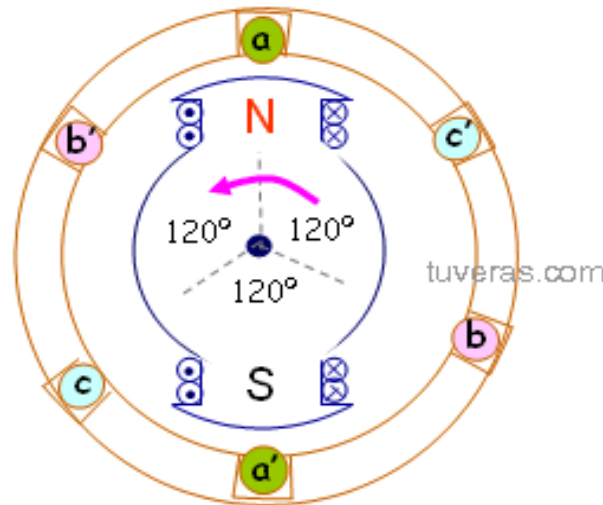


$$i_1(0) = I_0 \quad i_2(0) = -I_0/2 \quad i_3(0) = -I_0/2$$



Motor en vacío

Si a un alternador trifásico se le retira la máquina motriz y se alimenta su estator mediante un sistema trifásico de C. A. se genera en el estator un campo magnético giratorio, cuya velocidad sabemos que es $N = 60 \text{ f/p}$. Si en estas circunstancias, con el rotor parado se alimenta el devanado del mismo con C. C. se produce un campo magnético rotórico fijo, delante del cual pasa el campo magnético del estator. Los polos del rotor están sometidos ahora a atracciones y repulsiones, en breves periodos de tiempo, por parte de los polos del estator, pero el rotor no consigue girar, a lo sumo vibrará. Pero si llevamos el rotor a la velocidad de sincronismo, haciéndole girar mediante un motor auxiliar, al enfrentarse polos de signo opuestos se establece un *enganche magnético* que les obliga a seguir girando juntos, pudiéndose retirar el motor auxiliar.

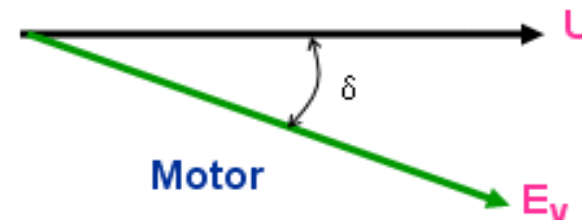
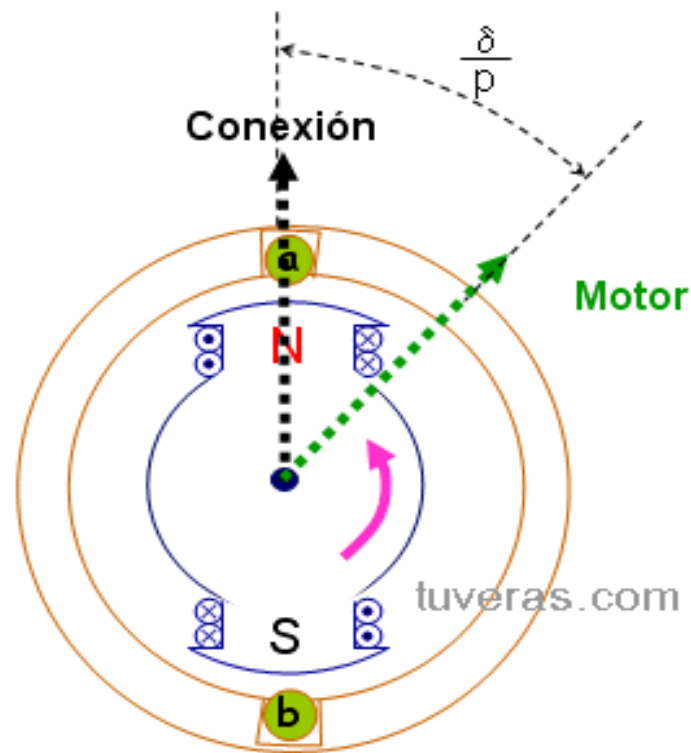


$$U = E_v$$

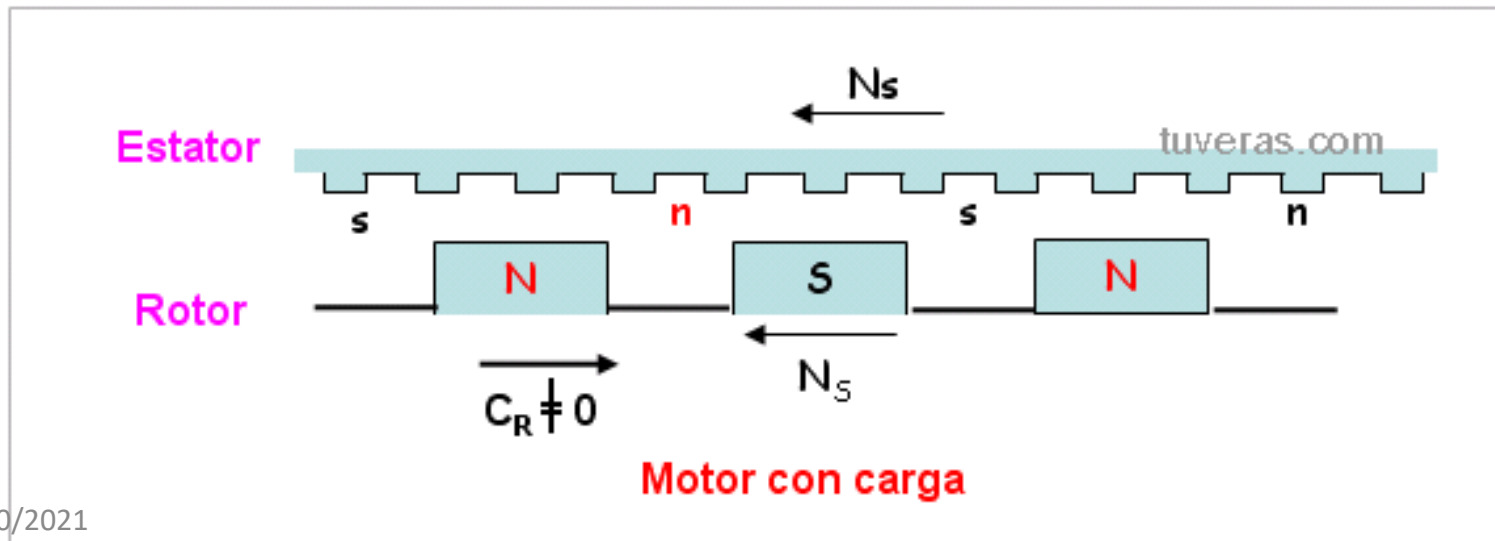
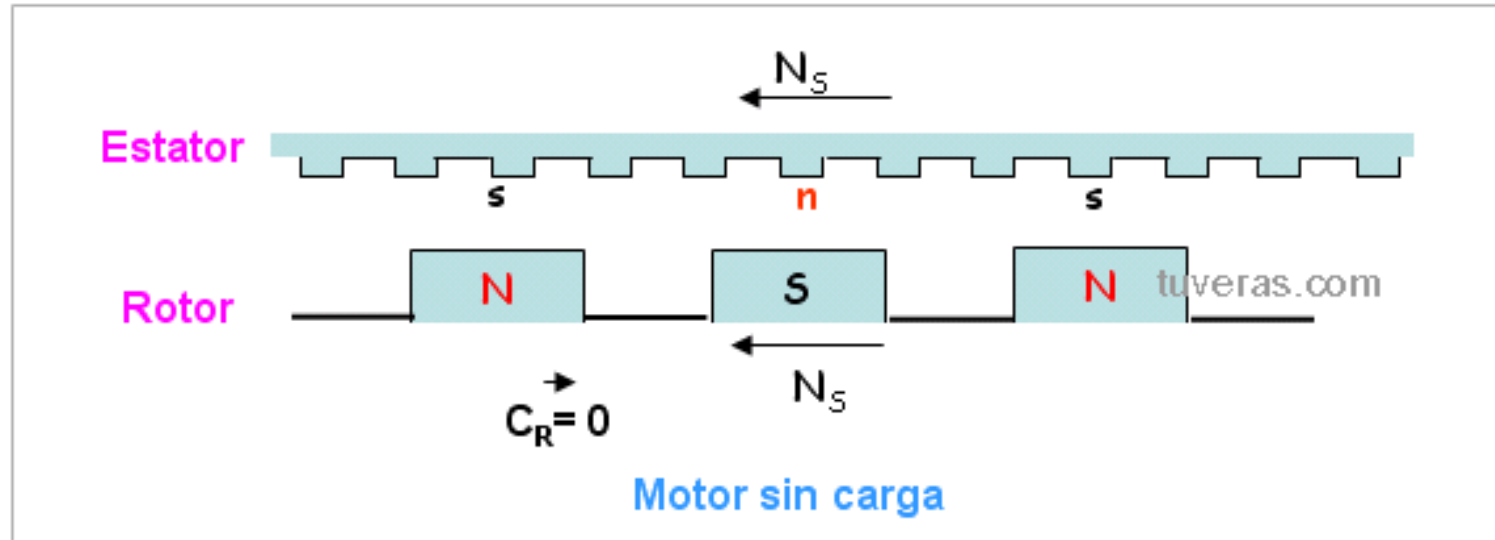
Motor en vacío

Motor en carga

Una vez que se produzca la conexión del motor a la red, se produce un desplazamiento (δ/p) del eje de los polos del rotor respecto de los polos ficticios del estator, que aumenta con la carga del motor, y tal que si este desplazamiento supera un límite el motor se para.

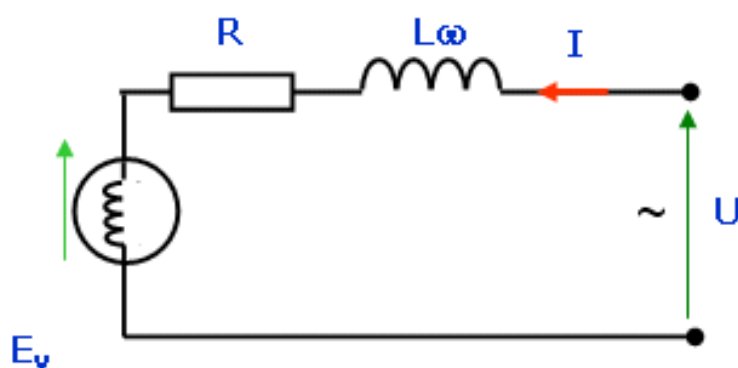


Motor en vacío y en carga



Circuito Equivalente. Diagrama de Blondel

Al conectar el motor síncrono a la red, el estator se comporta como el primario de un transformador



R = resistencia inducida por fase

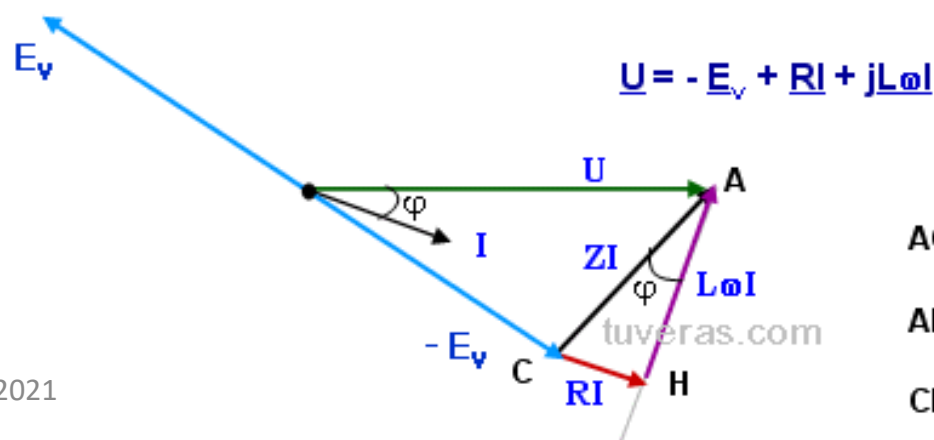
$L\omega$ = caída inductiva

E_v = tensión autoinducida por fase

U = tensión de fase de la línea

Diagrama de Blondel

El diagrama de Blondel supone que L es cte. Para todos los regímenes de funcionamiento y el alternador es de polos lisos.

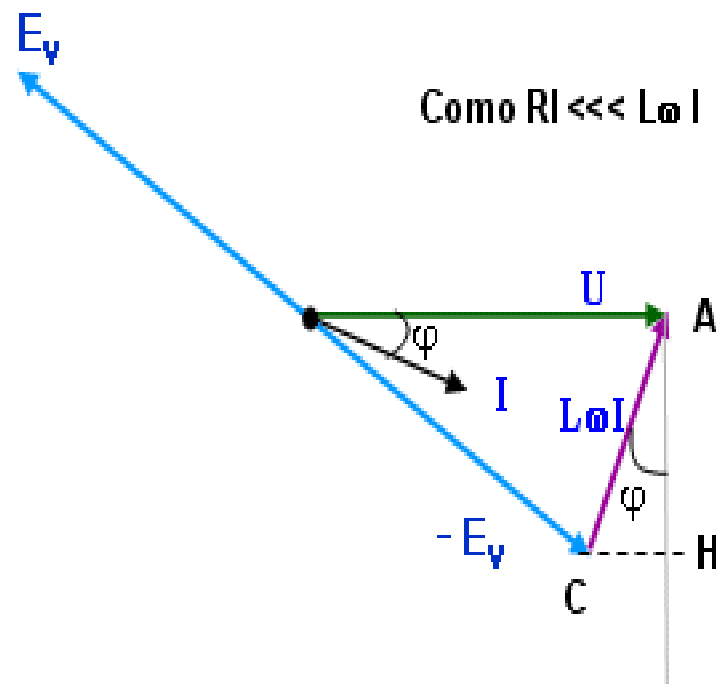


$$AC = ZI = KI$$

$$AH = ZI \cos \varphi = \frac{U}{U} ZI \cos \varphi = KP = K'C$$

$$CH = L\omega I \sin \varphi = \frac{U}{U} L\omega I \sin \varphi = KQ$$

Diagrama Simplificado de Blondel



Como $R I \ll L \omega I \Rightarrow \underline{U} = -\underline{E}_v + j \underline{L} \omega I$

$$AC = L \omega I = K I$$

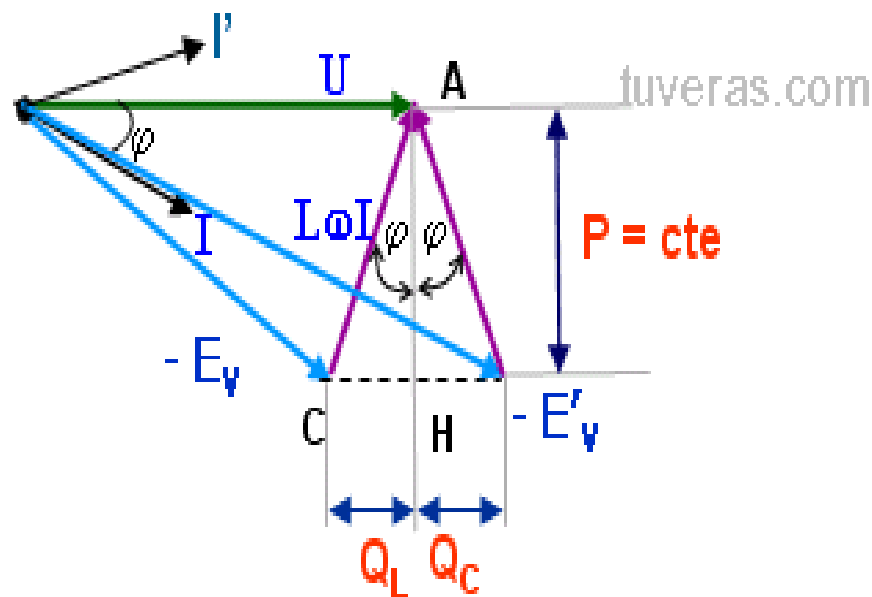
$$AH = L \omega I \cos \varphi = \frac{U}{U} L \omega I \cos \varphi = K P = k' C$$

$$CH = L \omega I \sin \varphi = \frac{U}{U} L \omega I \sin \varphi = K Q$$

Curvas en V (de Mordey)

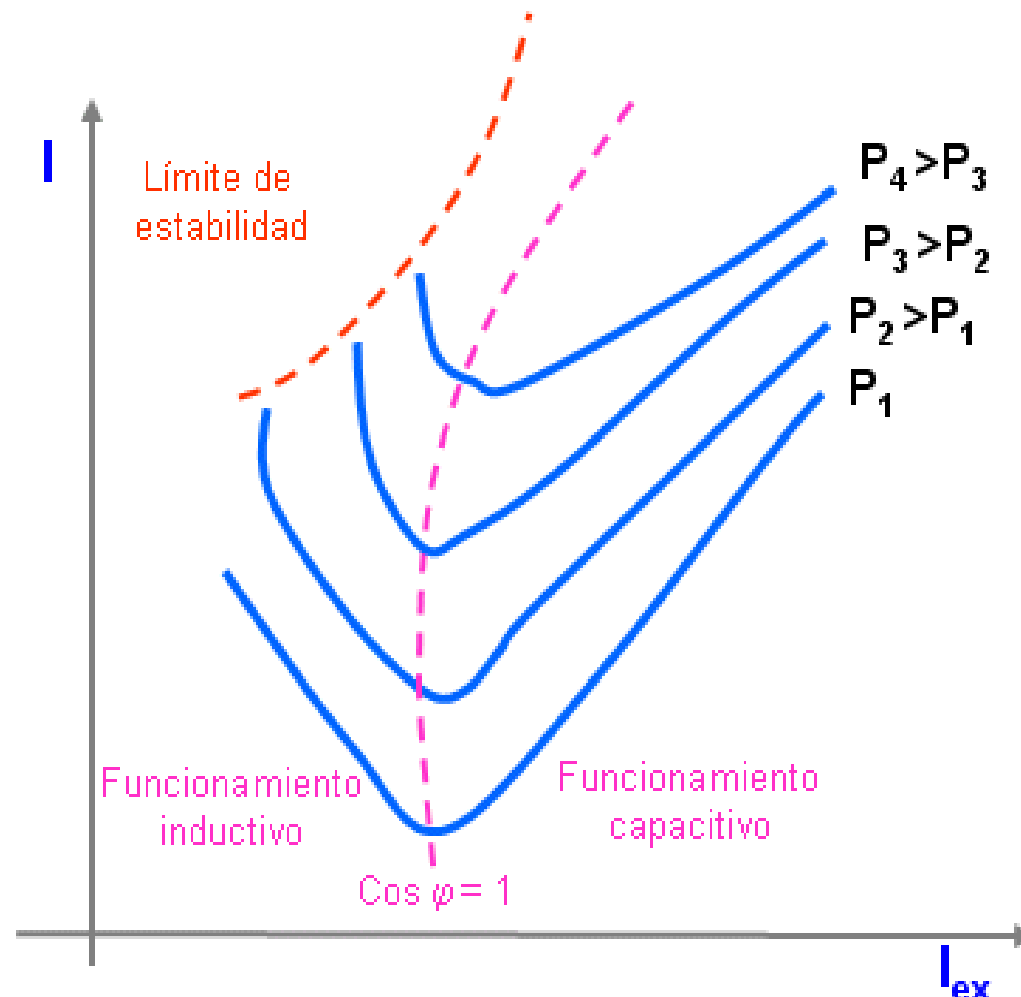
El motor síncrono para una misma potencia P , tal como vemos en la gráfica, puede absorber una corriente variable I según su excitación.

- El motor subexcitado absorbe potencia reactiva (Q_L)
- El motor sobreexcitado suministra potencia reactiva (Q_C)



Curvas en V (de Mordey)

Esta propiedad se traduce gráficamente en una serie de **curvas en V de Mordey**. Cada una de ellas da para una *potencia útil constante*, la variación de la corriente absorbida I en función de la corriente de excitación I_{ex}



Potencia y Par del Motor

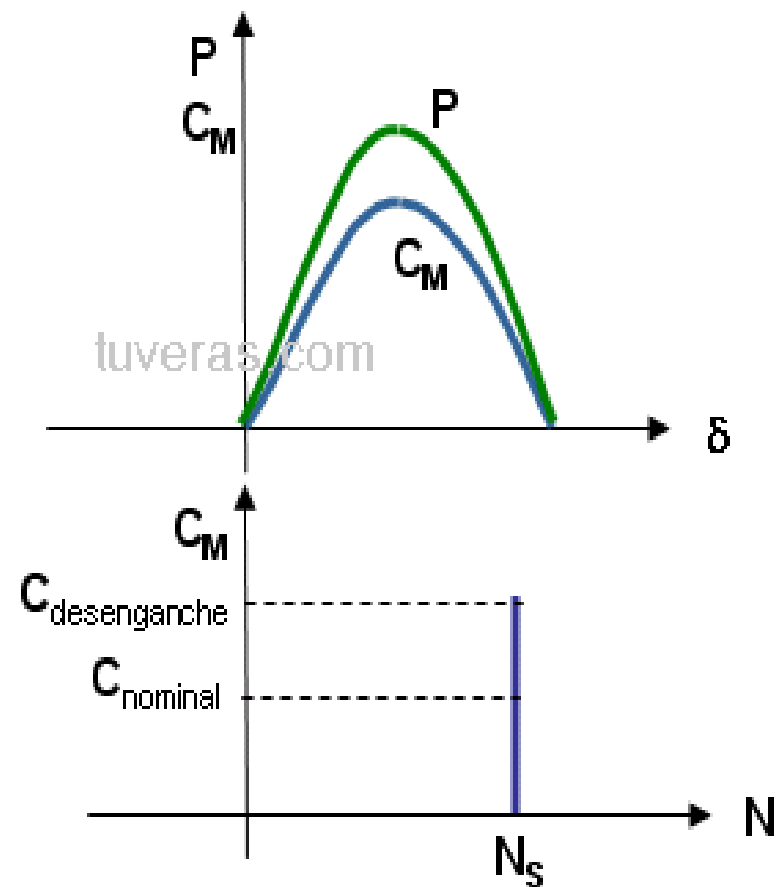
Hemos visto que la potencia de una máquina síncrona, **por fase**, viene dada por la fórmula:

$$P = \frac{E_v U \sin \delta}{X_s} = P_{\max} \sin \delta$$

Y como:

$$P = C_M \omega \Rightarrow C_M = P / \omega \Rightarrow C_M = \frac{60 P}{2 \pi N_s}$$

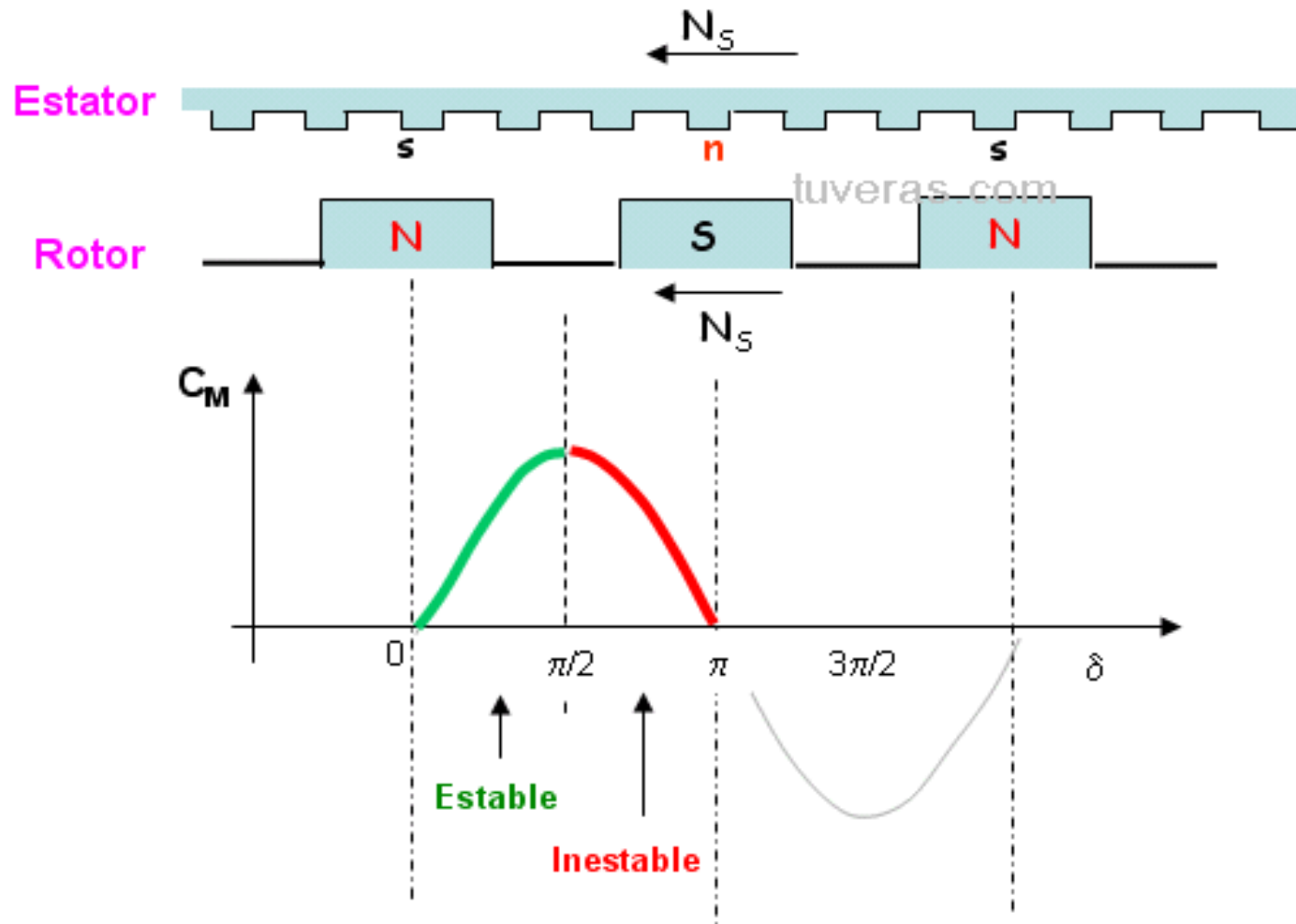
Por otra parte, el par no es función de la velocidad, pues esta permanece cte. , velocidad de sincronismo, independientemente de la carga, a no ser que se supere el máximo par posible en el motor y entonces se sale del sincronismo y se para



Potencia y par motor

d_{rotor}	[m]	0,2	0,4	0,8	1,2
p	[-]	2	2	3	4
n_s	[rpm /min]	1500	1500	1000	750
T_e	[Nm]	203	1623	9200	25000
P_{as}	[kW]	31,3	250	945	1950
η	[-]	0,858	0,915	0,941	0,949

Estabilidad del Motor



Hemos visto que en una máquina síncrona la curva del par tiene forma sinusoidal. Para la estabilidad del motor se requiere que el desplazamiento polar sea inferior a $\pi/2$ (ángulo eléctrico). En este caso una desaceleración del motor, desplazamiento de los polos reales hacia atrás, lleva consigo un aumento del par motor, cosa que no se produce más allá del ángulo $\pi/2$