



Escuela de Educación Técnica N°460 “Guillermo Lehmann”

Operación, mantenimiento y ensayos de equipos electromecánicos

Escuela de Educación Técnica N°460 “Guillermo Lehmann”

Modulo:

*Operación, mantenimiento y ensayos de
equipos electromecánicos*

Temas:

**Generadores sincrónicos trifásicos
(Alternadores)**

Electromecánica



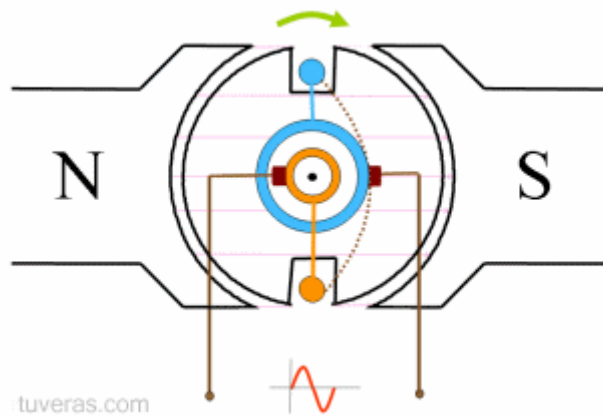
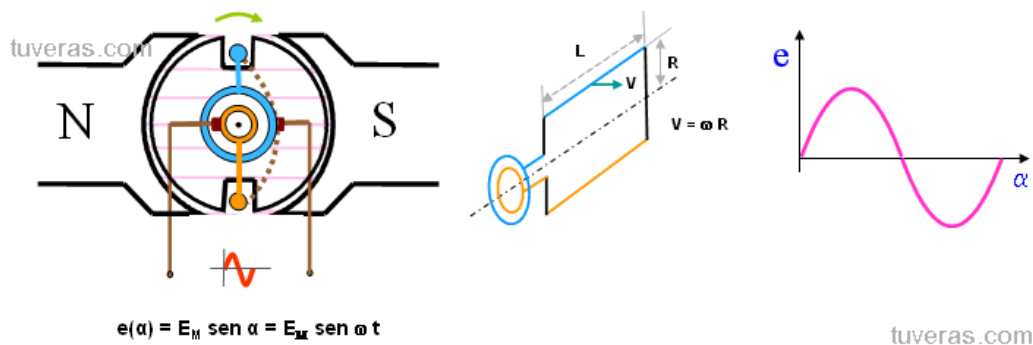
El Alternador Elemental

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:

$$e(\alpha) = E_M \sen \alpha = E_M \sen \omega t$$

teniendo como valor máximo

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

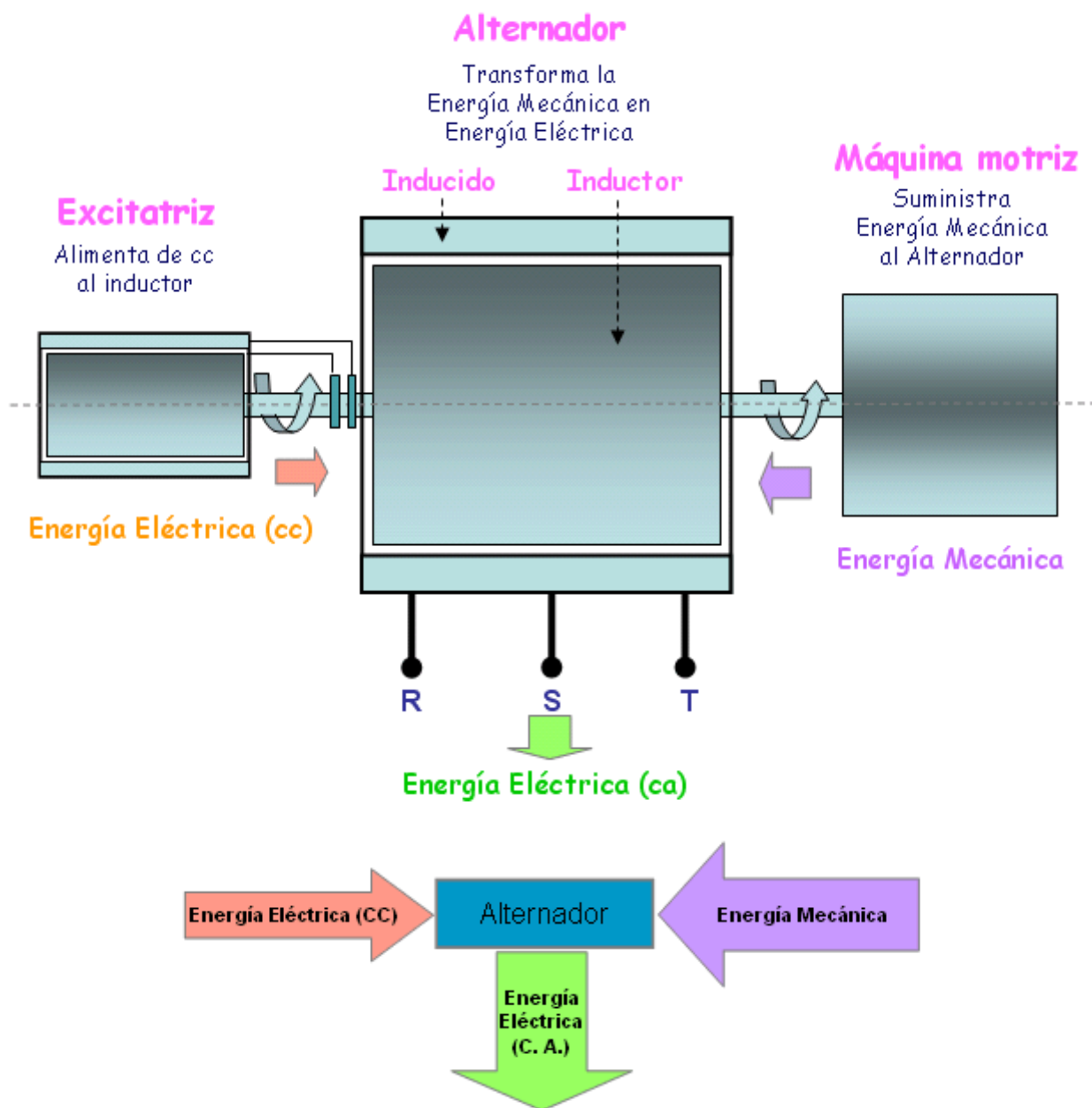


(Imagen animada)

Los contenidos aquí expuestos son válidos para alternadores monofásicos y trifásicos. En el caso del alternador trifásico, las consideraciones y magnitudes son de fase

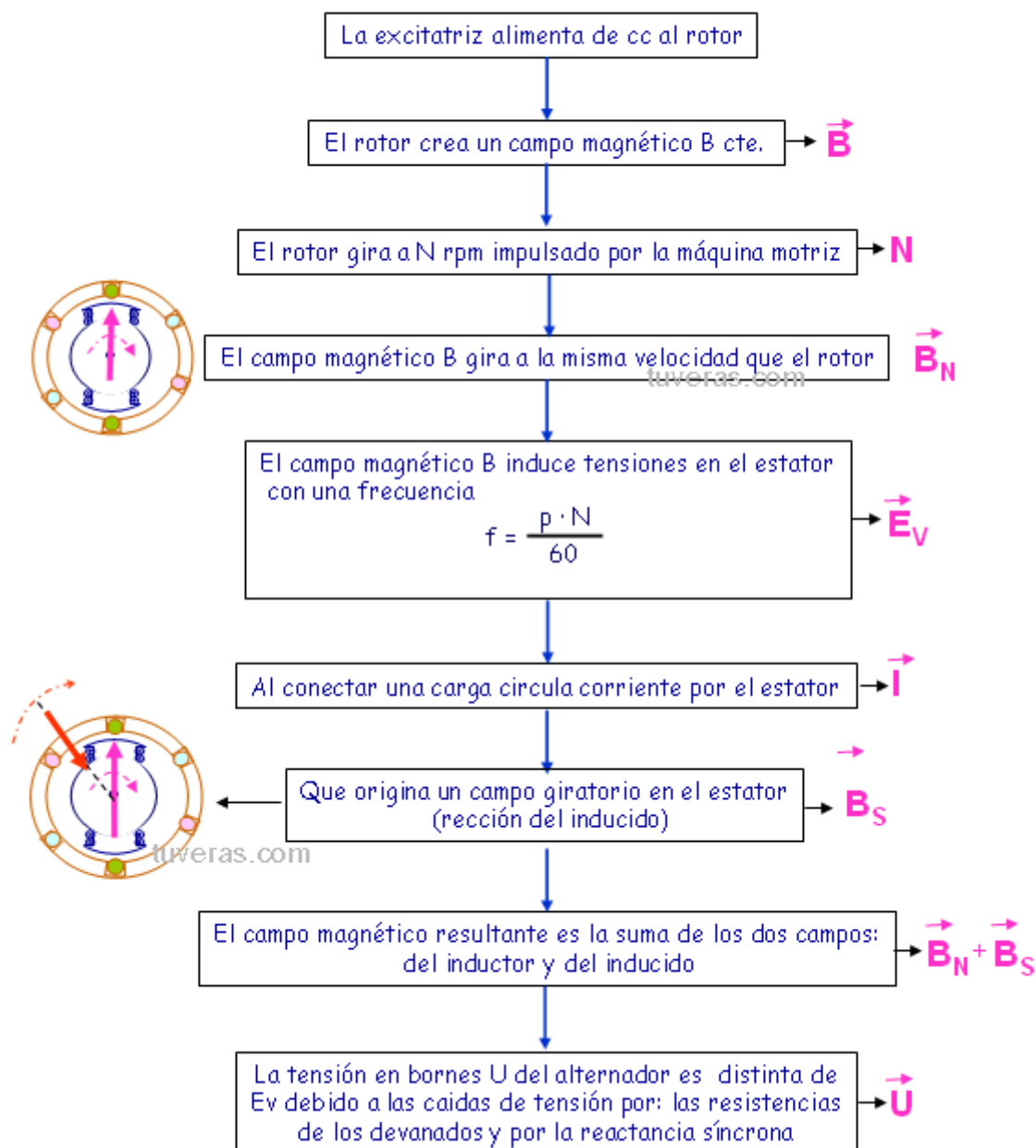


El Alternador





Principio de Funcionamiento

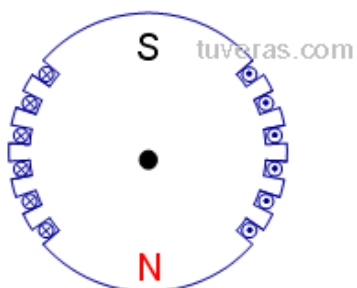




Tipos de Inductores

Rotor de Polos Lisos

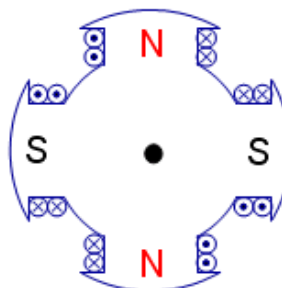
- Elevadas velocidades de giro (2 – 4 polos)
- Se usa con turbinas de gas y de vapor



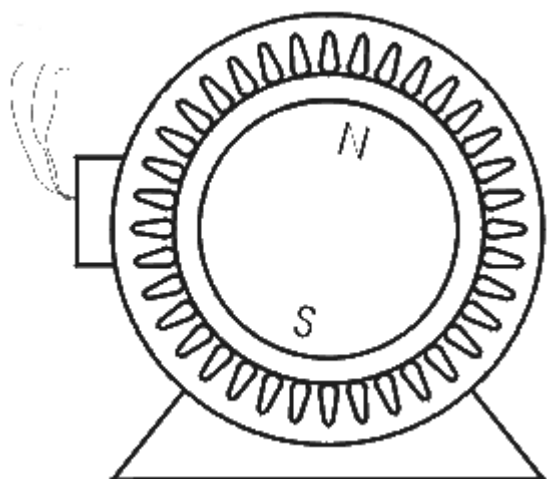
Rotor de polos lisos
 $p = 1$

Rotor de Polos Salientes

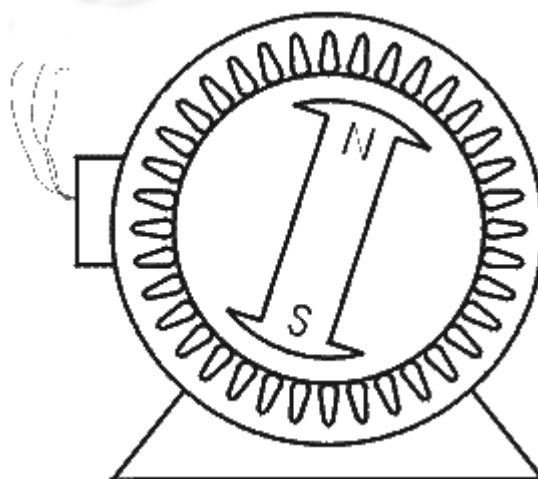
- Bajas velocidades de giro (+ de 4 polos)
- Se usa con turbinas hidráulicas



Rotor de polos salientes
 $p = 2$



$p = 1$

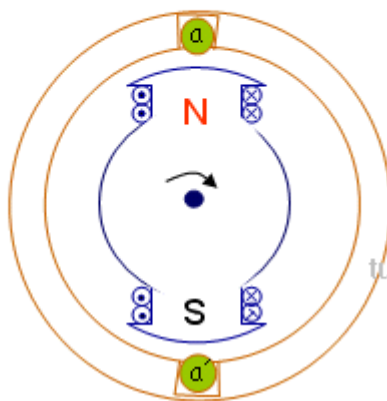


$p = 1$



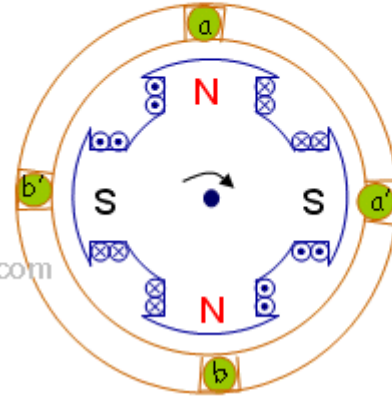
Revoluciones y Pares de Polos

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 un 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:

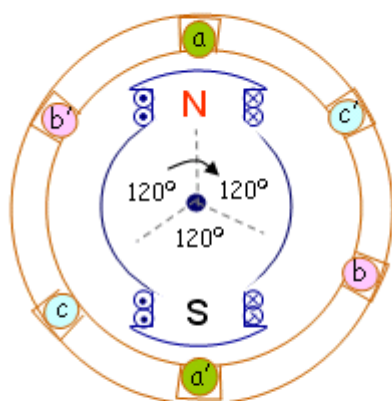
$$f = \frac{p \cdot N}{60}$$

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

2 polos para 3000 rpm
4 polos para 1500 rpm
6 polos para 1000 rpm, etc.

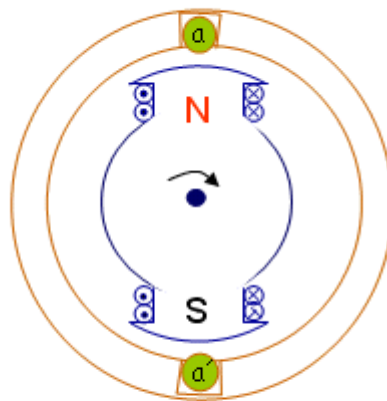


Alternador Trifásico



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

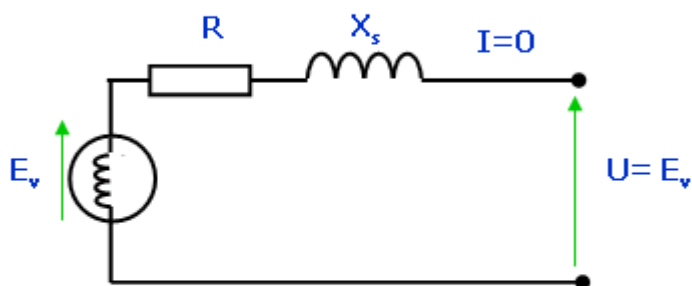
Alternador Monofásico



Un devanado (a-a')



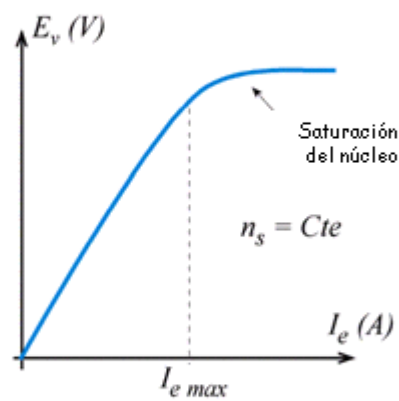
El Alternador en Vacío



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

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

$$\Phi = f(I_e)$$

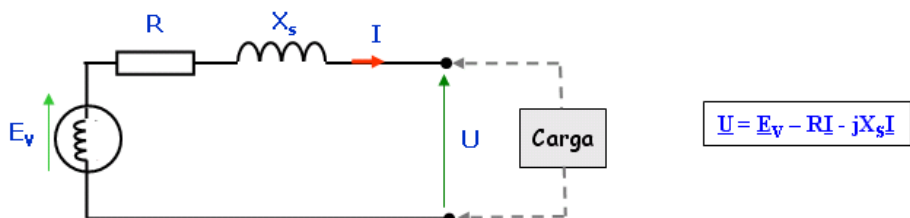


N = rpm
 Φ = flujo del inductor
 I_e = Intensidad de excitación
 K = cte. De proporcionalidad



Circuito Equivalente. Diagrama de Behn-Schenburg

Para una máquina de polos lisos y circuito magnético no saturado

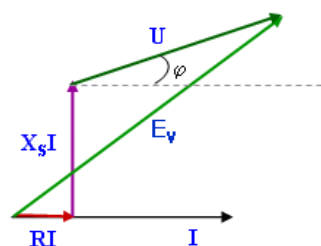


R = resistencia inducida por fase

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

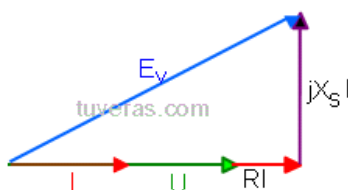
E_v = tensión en vacío por fase

U = tensión en carga por fase

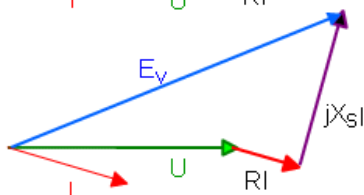


El Alternador con Diferentes Cargas

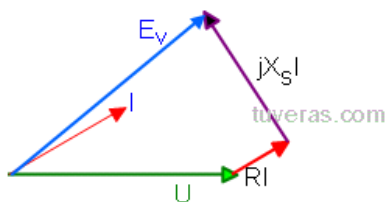
Carga resistiva



Carga Inductiva



Carga capacitiva



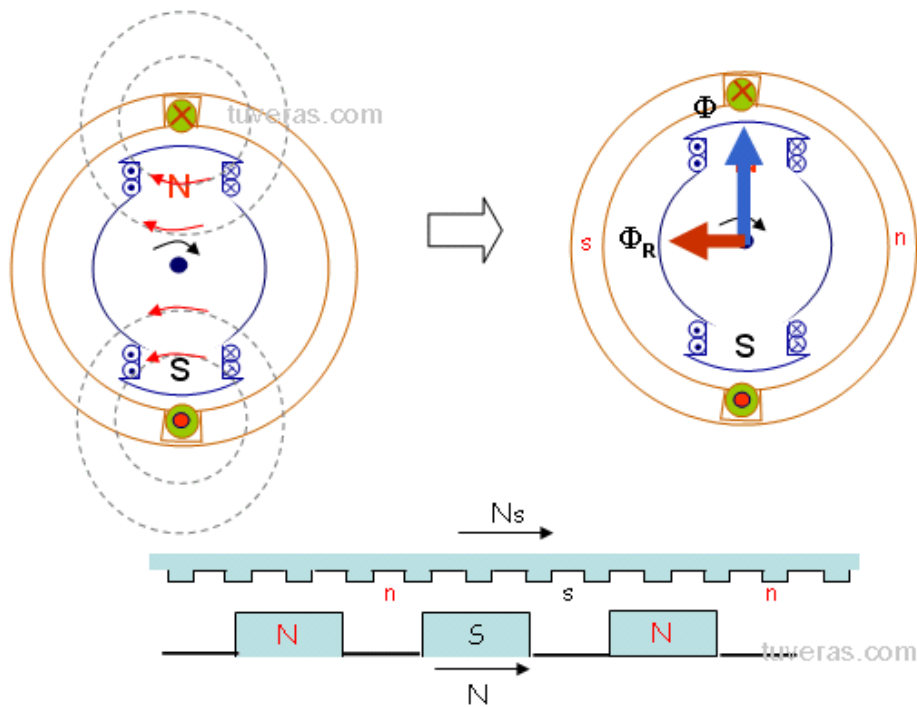


Reacción del Inducido

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

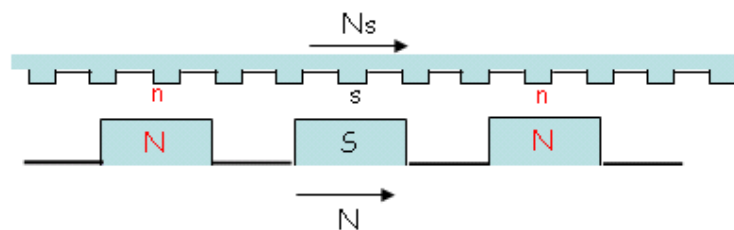
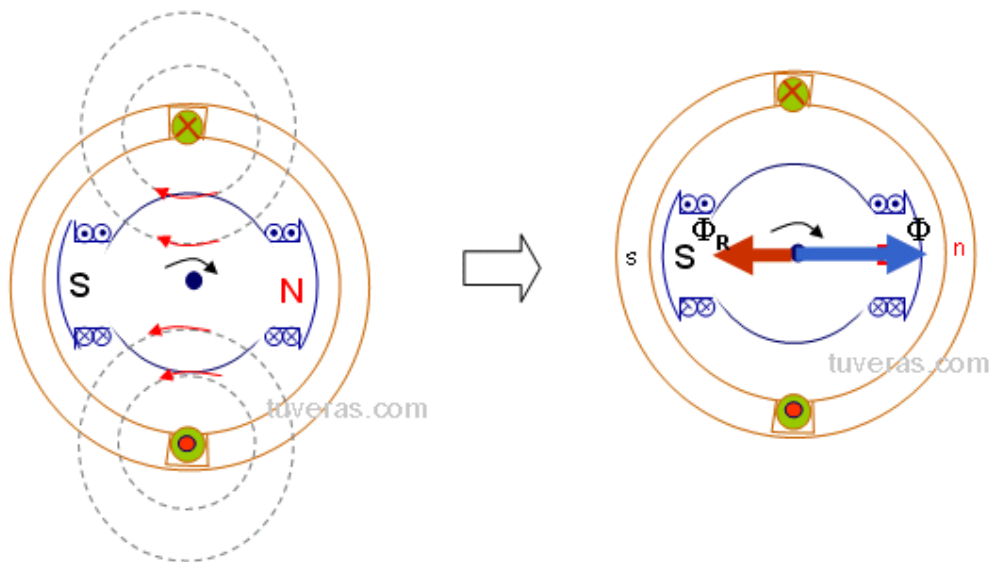
La tensión y la corriente en el inducido están en fase.
Los polos ficticios están intercalados entre los polos del inductor.





Circuito de consumo inductivo. Reacción longitudinal sustractiva

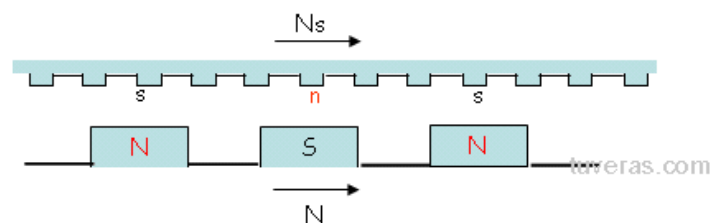
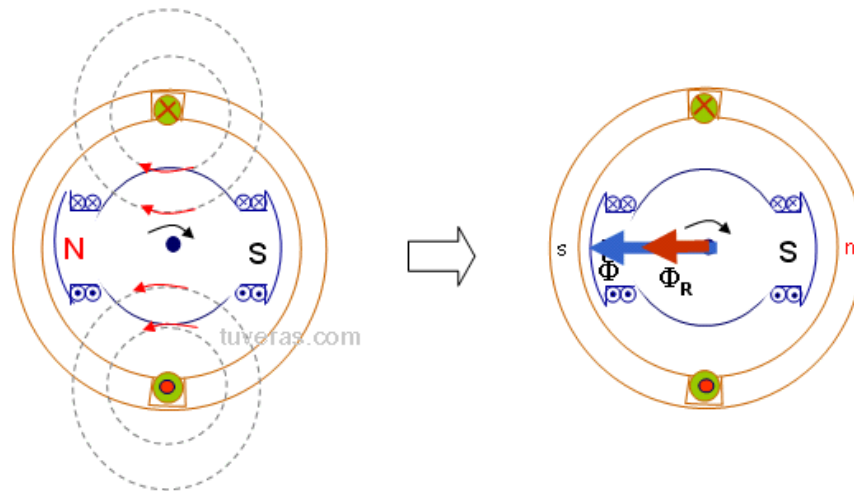
La corriente en el inducido atrasa $\pi/2$ rad, $1/4$ de periodo, respecto a la tensión. En ese tiempo el rotor gira 90°
Los polos ficticios están enfrente a los polos del inductor del mismo signo.



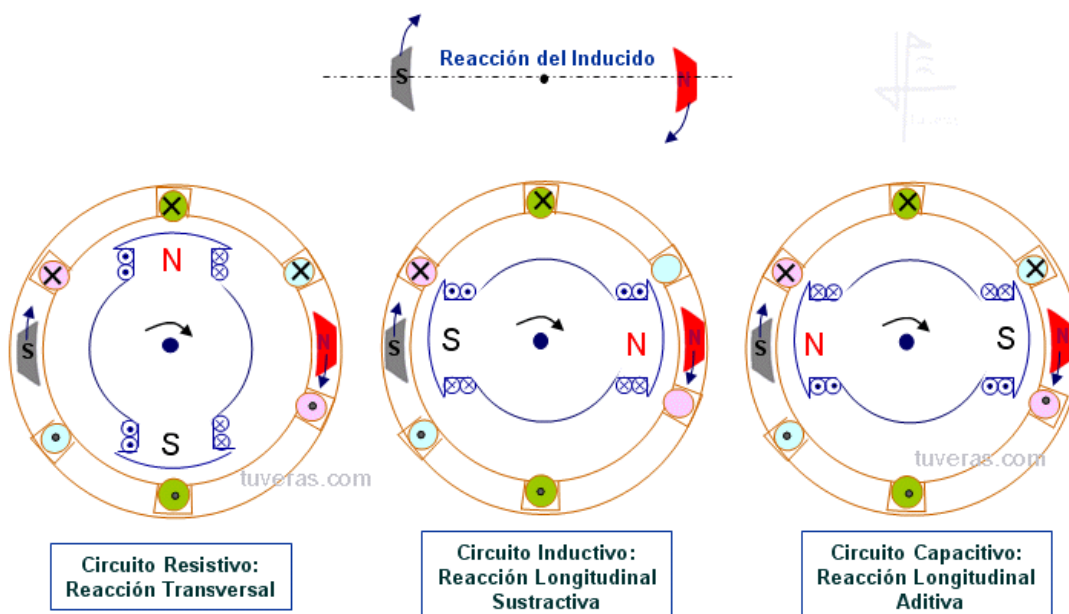


Circuito de consumo capacitivo. Reacción longitudinal aditiva

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





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

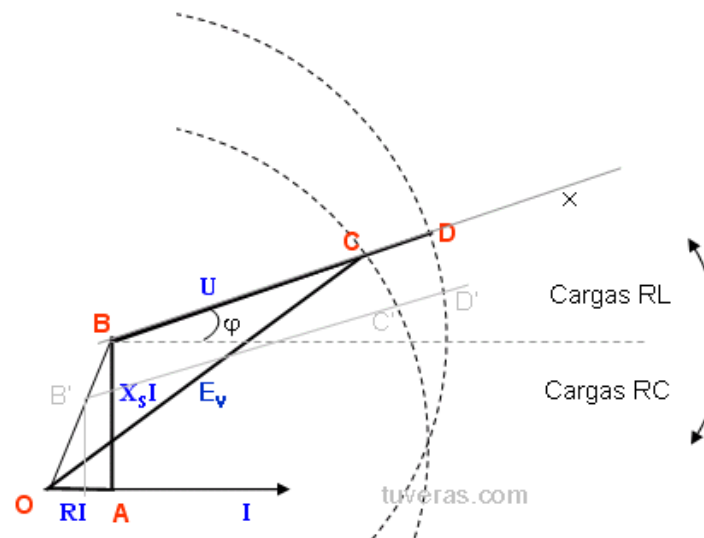
Este par es debido a las fuerzas magnéticas tangenciales que se ejercen entre los polos reales y ficticios.

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

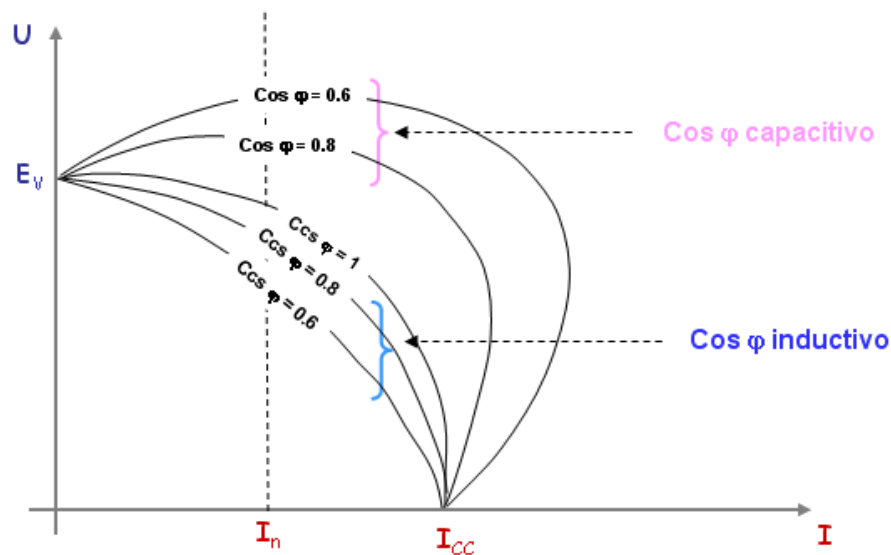
- Se excita el alternador con una corriente **I_e**
- Se sabe que ha de suministrar **I** amperios con un **cos φ**
- ¿Cuál será la tensión **U** en bornes del alternador?
- Se conoce **R** y **X_s**

- 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 **OD** (**E_v**) que corta a x en **D**
- La **caída de tensión** en el alternador = **E_v - U = OD - BC = CD**



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



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

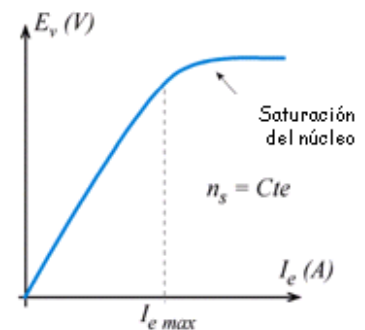
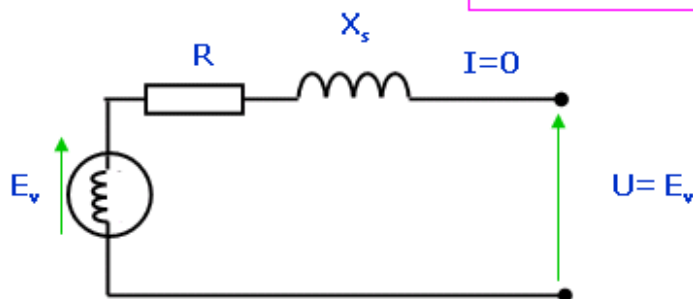


Diagrama de Behn-Schenburg: Determinación de la Reactancia Síncrona

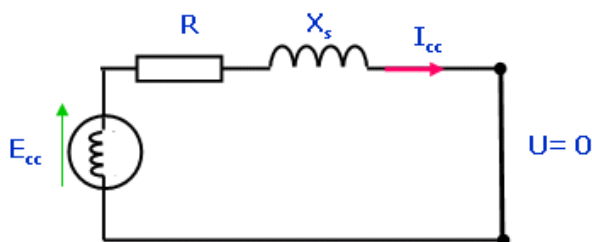
Se ha de realizar:

- **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

Prueba en Vacío

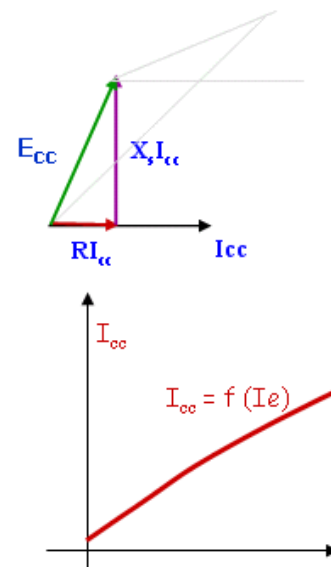


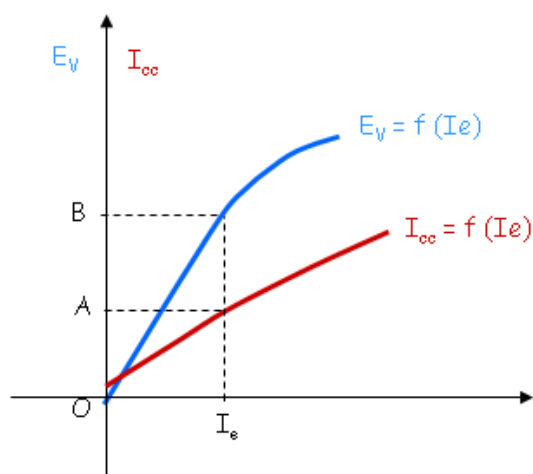
Prueba en Cortocircuito



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

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





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

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

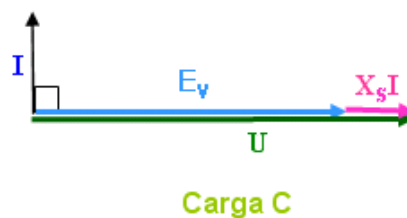
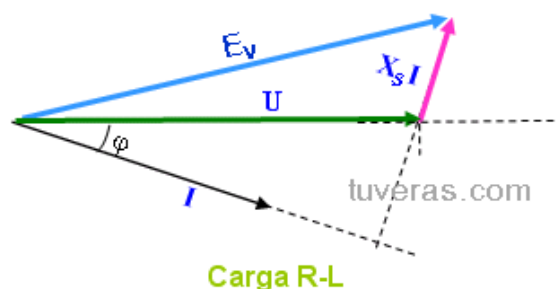
$$X_s = \sqrt{Z_s^2 - R^2}$$

Diagrama de Behn-Schenburg Simplificado

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

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

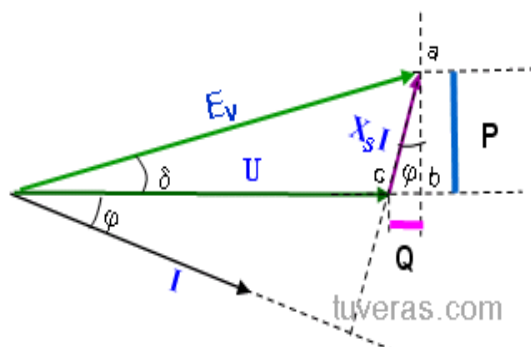
Y los esquemas con diferentes cargas serán:





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**



$$ab = X_s I \cos \varphi$$

$$ab = \frac{X_s U I \cos \varphi}{U} = k P$$

$$bc = X_s I \sin \varphi$$

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

$$ga = X_s I = k' I$$

$$\left. \begin{array}{l} P = U I \cos \varphi \\ X_s I \cos \varphi = E_v \sin \delta \Rightarrow I \cos \varphi = \frac{E_v \sin \delta}{X_s} \end{array} \right\} P = \frac{E_v U \sin \delta}{X_s} = P_{\max} \sin \delta$$



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

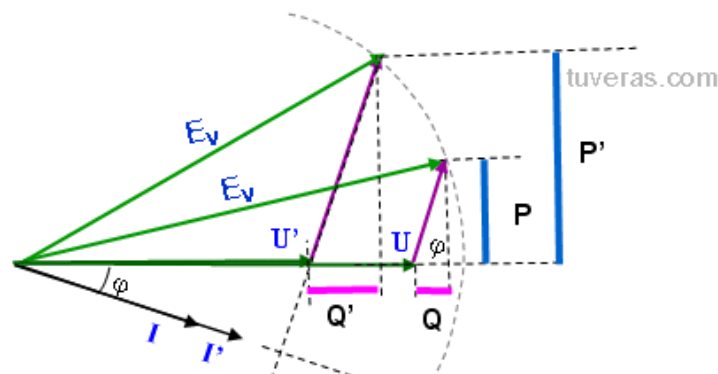
Supongamos que aumenta la carga del alternador sin variar el fdp.

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

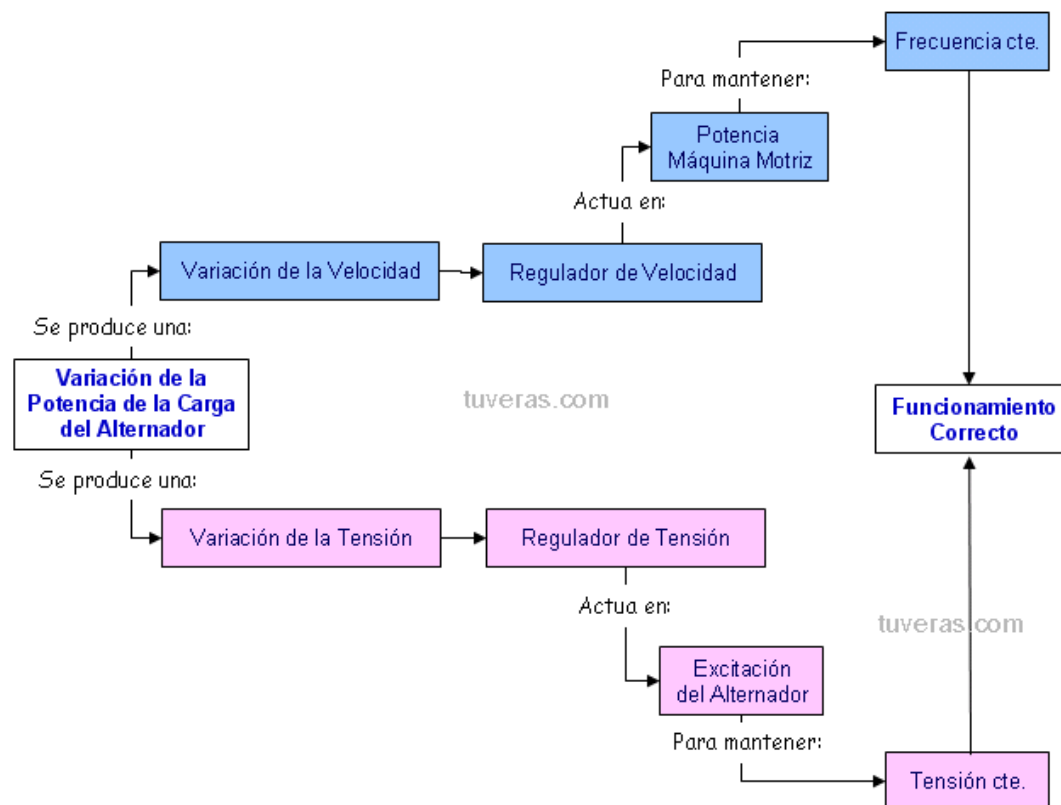




Operación, mantenimiento y ensayos de equipos electromecánicos

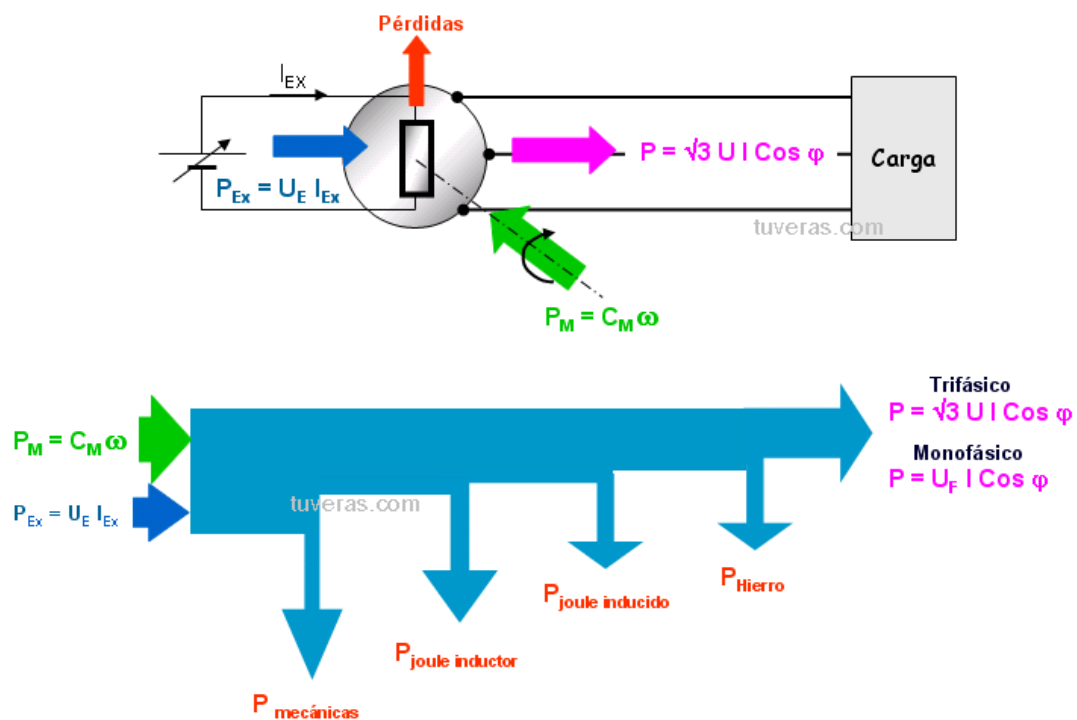
Al producirse variaciones en la carga de un alternador, es necesario regular el sistema máquina motriz-alternador, actuando sobre la excitación del alternador, para mantener la tensión de la red cte., y en la potencia de la máquina motriz, para mantener la velocidad y en consecuencia la frecuencia cte.

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





Balances de Potencias. Rendimiento

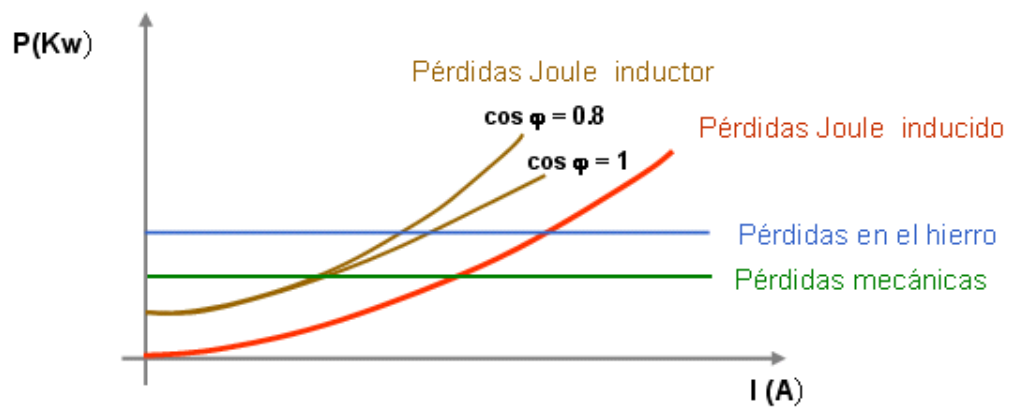


$$\eta = \frac{\text{Potencia de salida}}{\text{Potencia de entrada}} = \eta = \frac{P}{P_M + P_{Ex}} = \eta = \frac{P}{P + P_{Pérdidas}}$$

Si el alternador está 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 → Pérdidas mecánicas
- Alternador excitado en vacío girando a su velocidad nominal → Pérdidas mecánicas y en el hierro
- Mediante cálculo se obtienen las pérdidas por efecto Joule ($R I^2$) → Pérdidas por efecto Joule

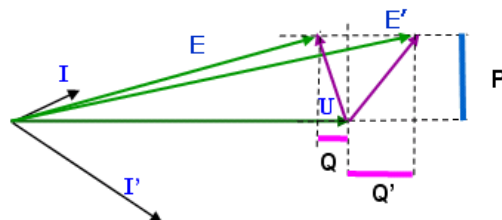




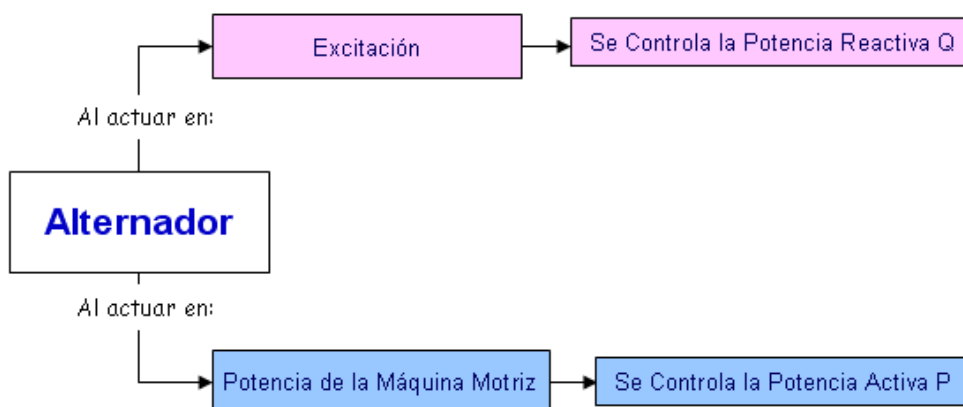
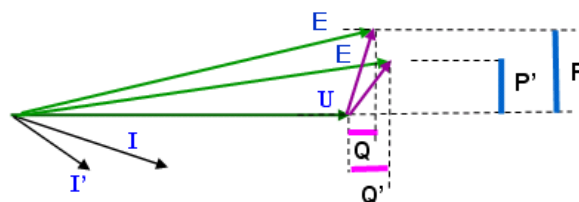
El Alternador Acoplado a una Red de Potencia Infinita

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)

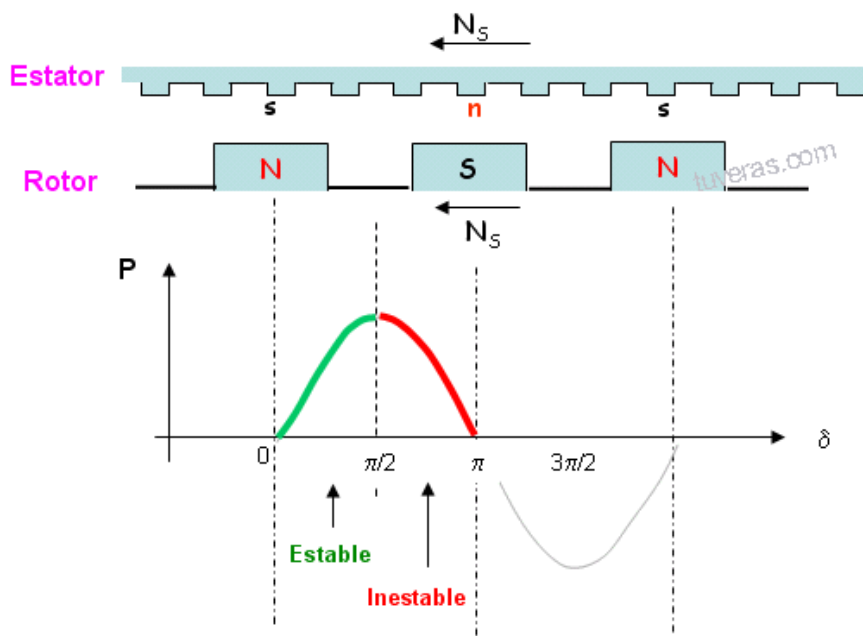


Actuando sobre la potencia de la máquina motriz, no se varía la frecuencia, que está fijada por la red, lo que se consigue es variar la potencia activa entregada por el alternador a la red





Estabilidad del Alternador Acoplado



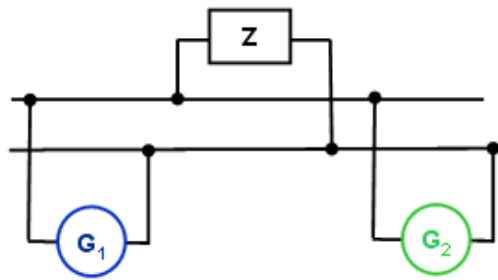
Hemos visto que en una máquina síncrona la curva del par tiene forma sinusoidal. Para la estabilidad del alternador se requiere que el desplazamiento polar sea inferior a $\pi/2$ (ángulo eléctrico). En este caso un adelanto de la rueda polar, desplazamiento de los polos reales hacia adelante, lleva consigo 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*.



Marcha en Paralelo de Dos Alternadores

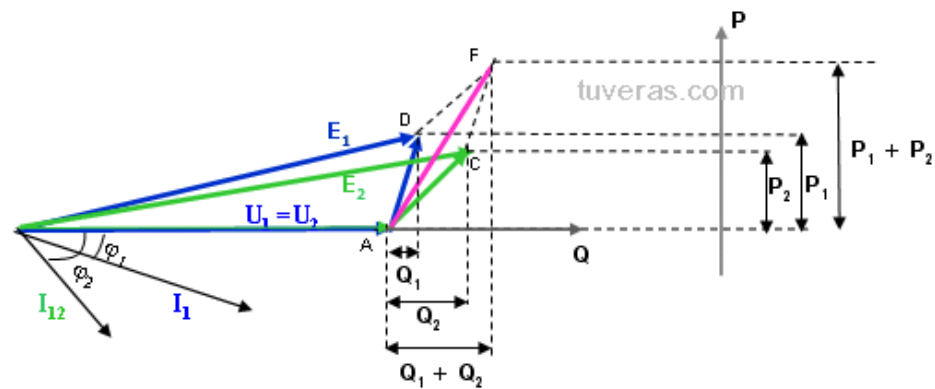
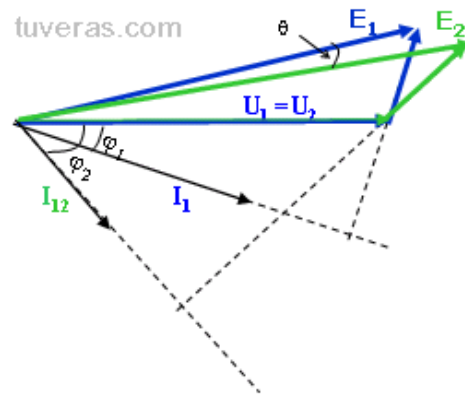
Estudiamos la marcha en carga de dos alternadores en paralelo con las hipótesis siguiente:

- Son aplicables las hipótesis de Behn-Schenburg
- Los dos alternadores son iguales
- Las potencias activas y reactivas absorbidas por la red son constantes



Como $Rl \ll X_s$

$$\begin{cases} E_1 = U + jX_s I_1 \\ E_2 = U + jX_s I_2 \end{cases}$$





Funcionamiento Óptimo de la Marcha en Paralelo

El conjunto de los dos alternadores tienen el mínimo de pérdidas de joule cuando las potencias activa y reactivas de los dos alternadores sean iguales, pues:

$$P_j = R(I_1^2 + I_2^2) = R(I_{a1}^2 + I_{r1}^2 + I_{a2}^2 + I_{r2}^2) = R[(I_{a1} + I_{a2})^2 - 2 I_{a1} I_{a2} + (I_{r1} + I_{r2})^2 - 2 I_{r1} I_{r2}]$$

Como se supone que la corriente de la red no cambia:

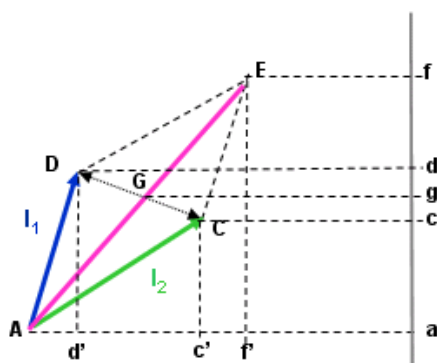
$$I_{a1} + I_{a2} = I_a = C^{te} \text{ y } I_{r1} + I_{r2} = I_r = C^{te}$$

El mínimo de P_j ocurre cuando:

$$I_{a1} = I_{a2} \text{ y } I_{r1} = I_{r2}$$

Es decir, cuando son iguales sus potencias activas y reactivas

$$\left(\begin{array}{l} \text{El producto de dos factores cuya suma es cte. es máximo cuando los factores son iguales} \\ z = x y \\ x + y = cte = K \\ \text{Máximo} \Rightarrow dz/dx = 0 \quad ; \quad z = (k - y) y = k y - y^2 \quad dz/dx = 0 = k - 2 y \Rightarrow \begin{array}{l} y = k/2 \\ x = k/2 \end{array} \end{array} \right)$$



Como suponemos que la potencia activa a_f y reactiva A_f son invariables, el vector AF es cte. en magnitud y dirección

Para conseguir el funcionamiento óptimo realizamos dos procesos:

1º) Para la igualdad de las potencias activas actuamos sobre la potencia de las máquinas motriz de los alternadores hasta que las potencias entregadas a la red por cada uno de ellos sean iguales.

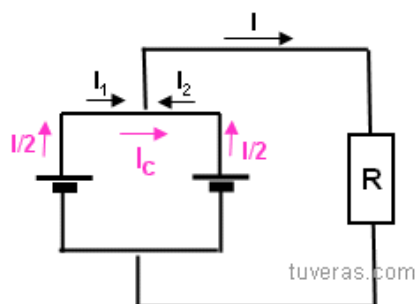
2º) Para la igualdad de las potencias reactivas actuamos sobre la excitación de los alternadores hasta conseguir que I_1 e I_2 sean iguales.

Al final de ambos procesos los puntos D y C se encontraran en G , verificándose que $P_1 = P_2$ y $Q_1 = Q_2$



Corriente de Cambio entre Dos Generadores de CC en Paralelo

Sean dos generadores de CC que suministran, respectivamente, las corrientes I_1 e I_2 a una red exterior.



$$I = I_1 + I_2$$

Sumando y restando $I_2/2$, se puede poner que:

$$I_1 = \frac{I_1 + I_2}{2} + \frac{I_1 - I_2}{2} = \frac{I}{2} + \frac{I_1 - I_2}{2}$$

Sumando y restando $I_1/2$, se puede poner que:

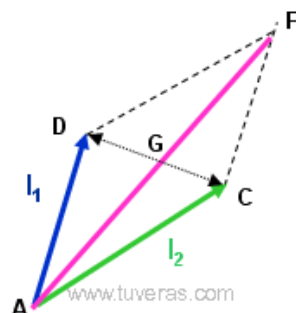
$$I_2 = \frac{I_1 + I_2}{2} - \frac{I_1 - I_2}{2} = \frac{I}{2} - \frac{I_1 - I_2}{2}$$

$$\text{Haciendo } \frac{I_1 - I_2}{2} = I_c \Rightarrow \begin{cases} I_1 = \frac{I}{2} + I_c \\ I_2 = \frac{I}{2} - I_c \end{cases}$$

Sucede como si los dos generadores suministrasen la misma corriente $I/2$ y, además, circulara entre los dos generadores una corriente I_c llamada corriente de cambio

Corriente de Cambio entre Dos Alternadores en Paralelo

En el diagrama del acoplamiento en paralelo de dos alternadores, podemos hacer de forma análoga al caso de los generadores de CC, las siguientes consideraciones:



$$I_1 = \underline{AD} = \underline{AG} + \underline{GD}$$

$$I_2 = \underline{AC} = \underline{AG} + \underline{GC} = \underline{AG} - \underline{GD}$$

Es como si los dos alternadores suministrasen la misma corriente AG y, además circulara entre ambos una corriente GD

A continuación veremos como esta corriente de intercambio favorece la **estabilidad del sistema**. A esta corriente de intercambio se le llama también **corriente de sincronismo**, a la que le corresponde una **potencia de sincronismo** con su par correspondiente, **par de sincronismo**.



Operación, mantenimiento y ensayos de equipos electromecánicos

$$P_1 = ad = ag + gd = af/2 + gd = P/2 + P_s$$

$$P_2 = ac = ag - gc = af/2 - gc = P/2 - P_s$$

$$P_s = g_d = g_c = \text{Potencia de Sincronismo}$$

Si en el alternador A_1 hay un aumento de velocidad, E_1 se adelanta y, necesariamente, al permanecer cte $P = af$, E_2 se retrasa. El ángulo θ aumenta. La potencia $gd=gc$ transportada por la corriente de cambio crece, y esto tiene como efecto:

- a) Sobrecargar (frenar) al alternador que se adelanta
b) Descargar (acelerar) al alternador que se atrasa

Ambos efectos tienden a volver al sincronismo a las dos máquinas. Por ello a la corriente de cambio se le llama **corriente de sincronismo**, y a la potencia correspondiente **potencia de sincronismo**, siendo su par correspondiente, **par de sincronismo**, cuyo valor es, si Ω es la velocidad de sincronismo:

$$C_s = \frac{P_s}{\Omega}$$