

EL 3003

Laboratorio de Ingeniería Eléctrica

Clase 3

Maquinas Eléctricas y Trifásicos

Profesor: Dr. Carlos Navarro C.
Departamento de Ingeniería Eléctrica
Universidad de Chile

Basado en las clases de la profesora
Dra. Constanza Ahumada.

Contenido

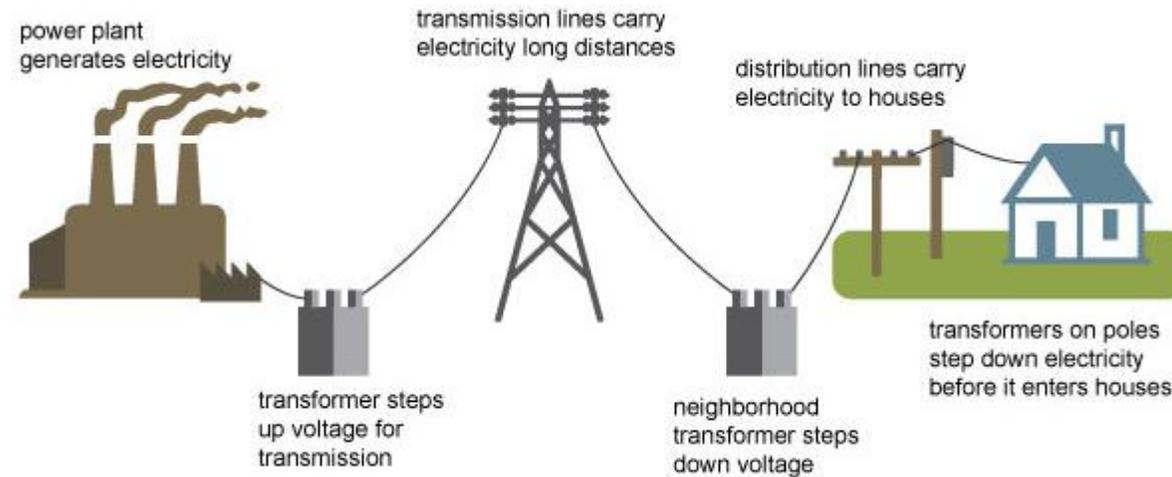
Sistemas Trifásicos

Sistema Eléctrico
Fasores
Secuencias
C. Equilibrados
C. Desequilibrados
Medición de Potencia

Máquinas Eléctricas

Síncronas
Inducción
Corriente Continua DC

Sistema Eléctrico



Source: Adapted from National Energy Education Development Project (public domain)

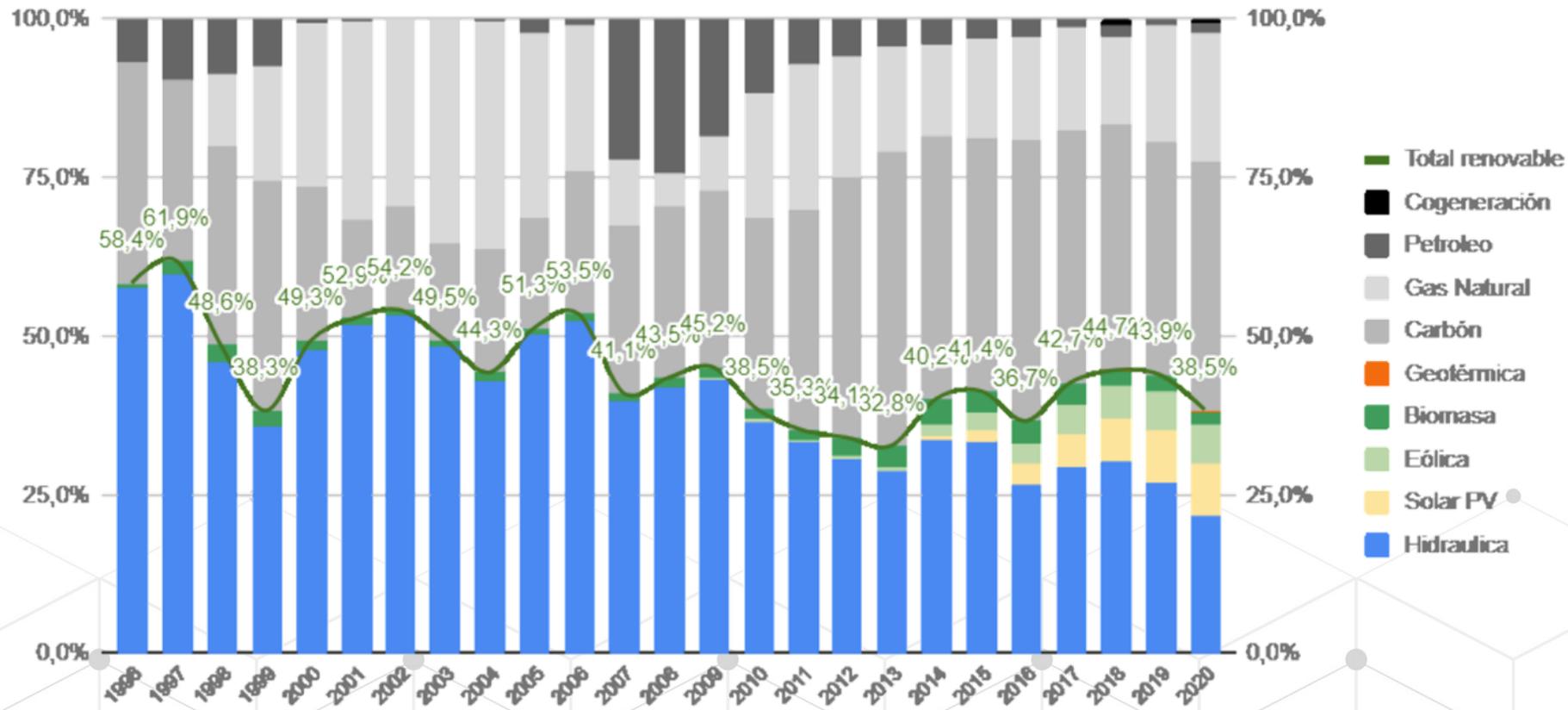
Generación	Transmisión	Distribución
Térmica	110kV	
Hidroeléctrica	154kV	
Solar	220kV	
Eólica	345kV	
	500kV	

Sistema Eléctrico - Generación



Sistema Eléctrico - Generación

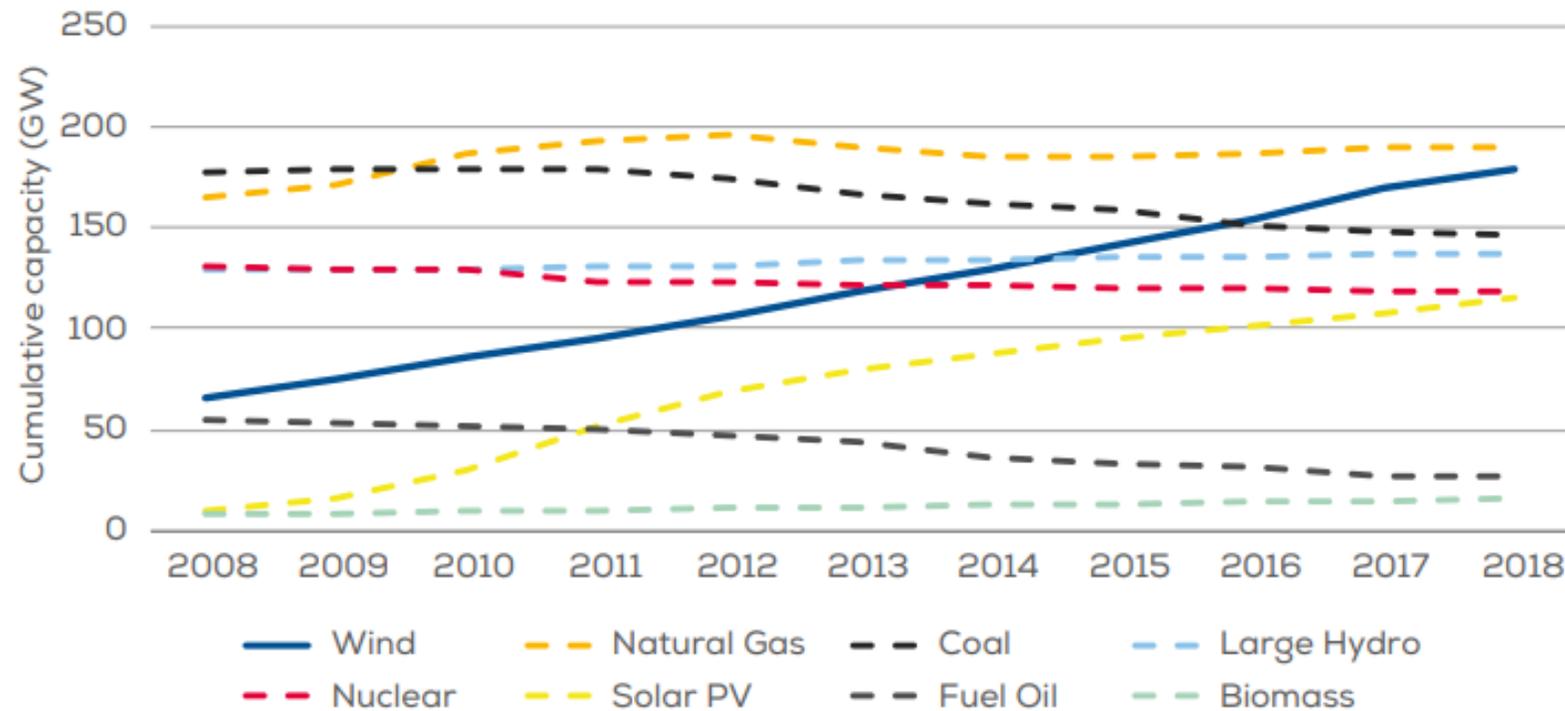
- ¿Cómo creen que es la generación en Chile?



Fuente: <http://generadoras.cl/generacion-electrica-en-chile>

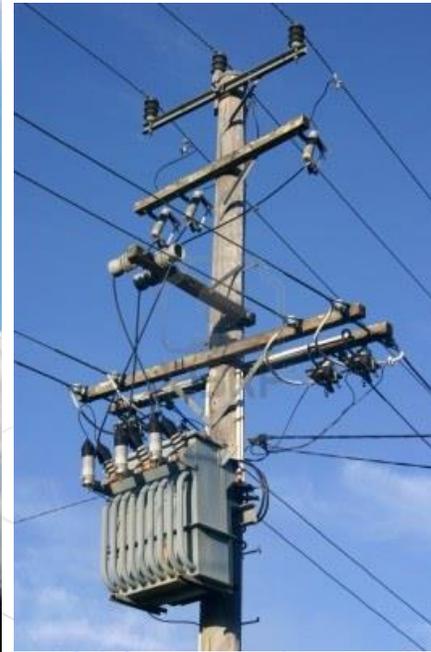
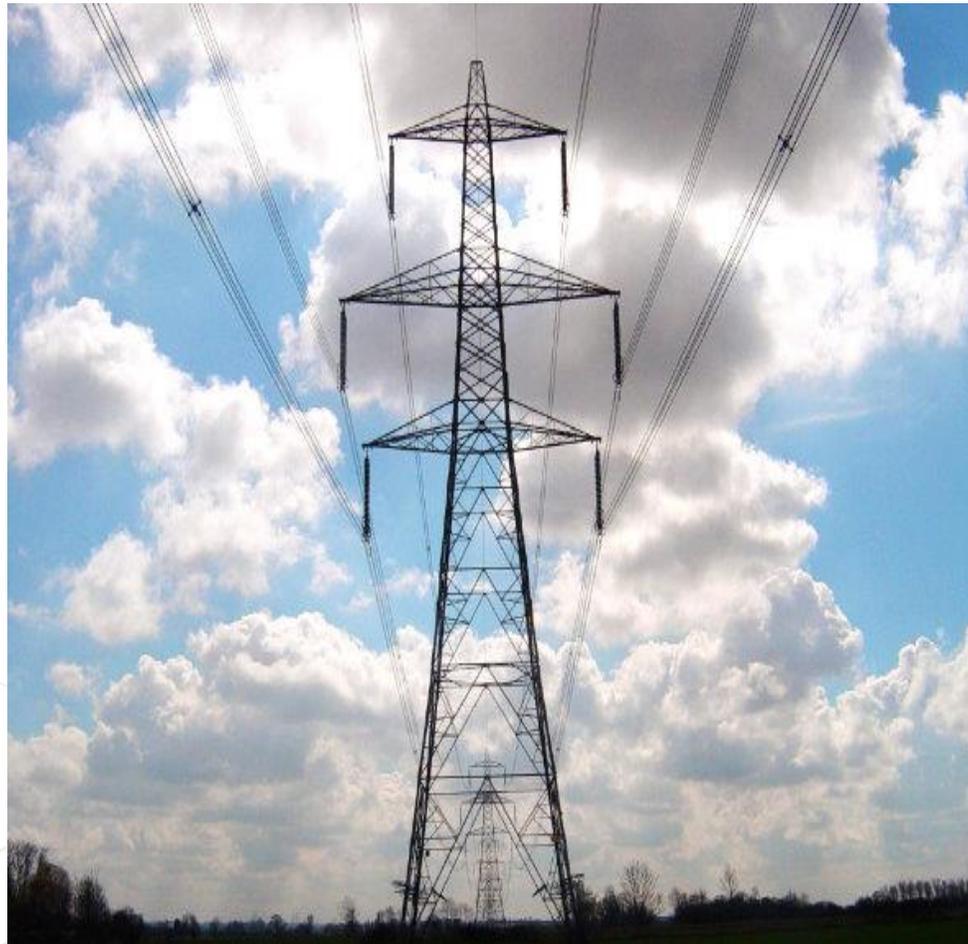
Sistema Eléctrico - Generación

- ¿Cómo creen que es la generación en otras partes?

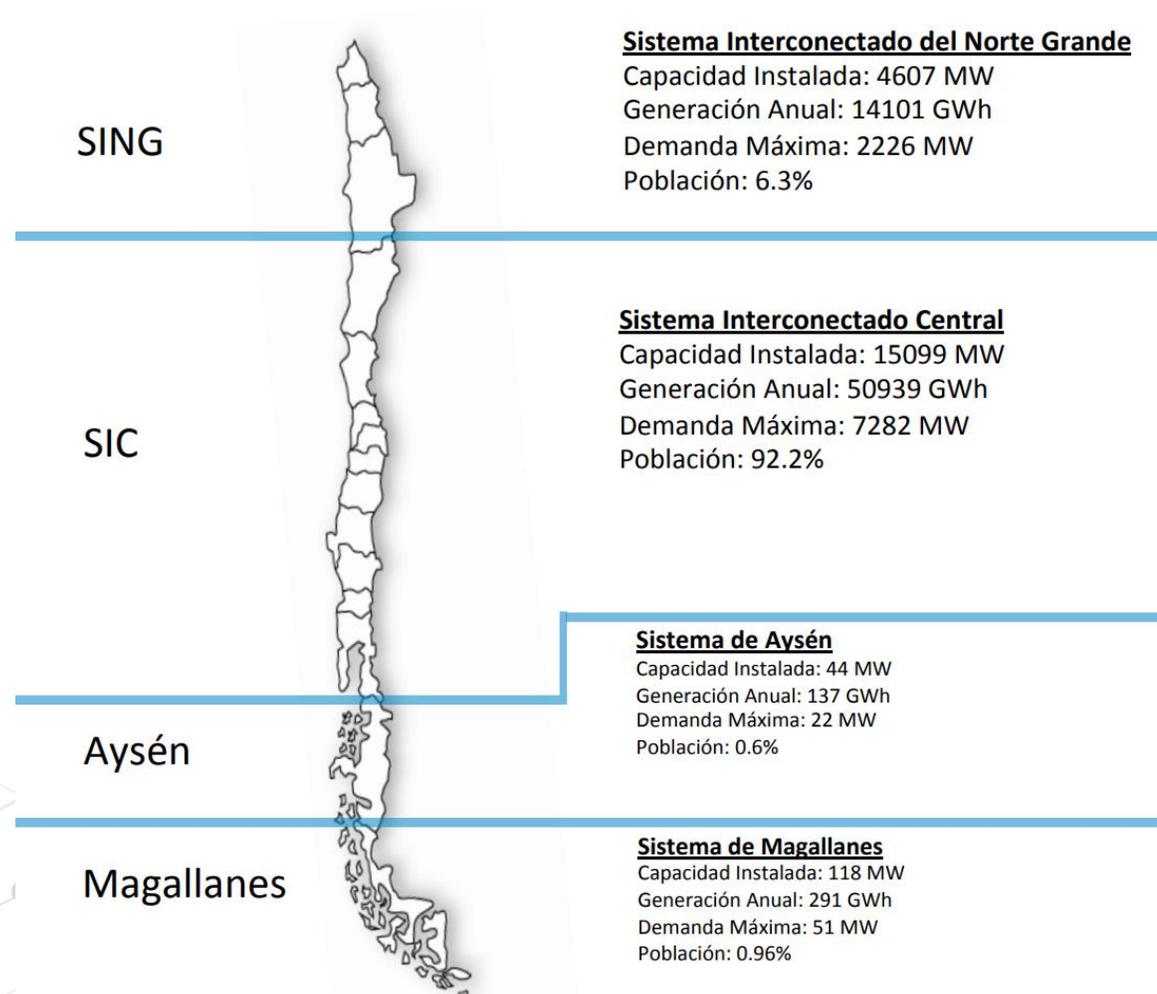


Source: WindEurope

Sistema Eléctrico - Transmisión y Distribución



Sistema Eléctrico



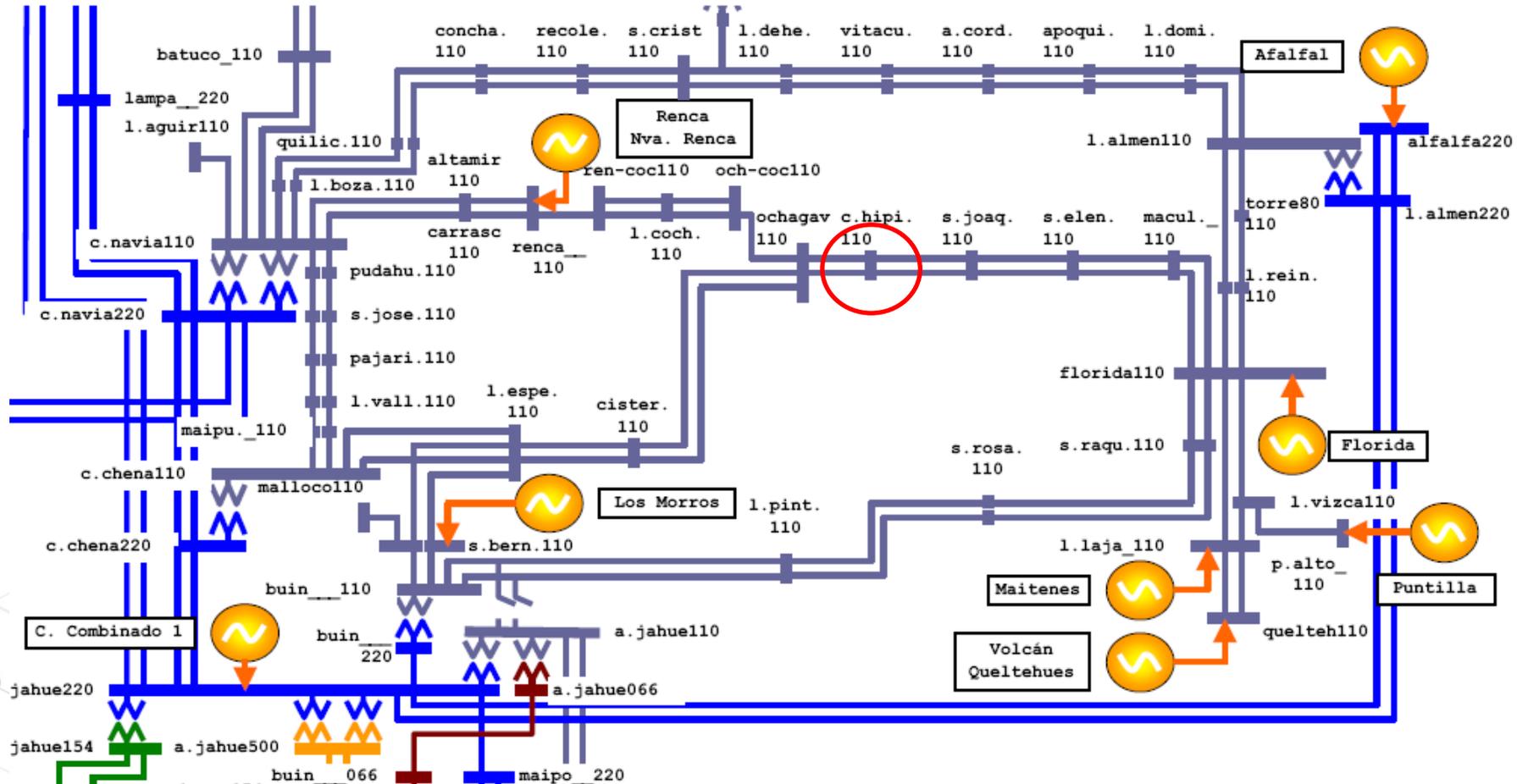
- Conectados desde Noviembre 2017
- Sistema Eléctrico Nacional
- 77312 GWh generados el 2019
 - 33978 GWh renovables
 - 43334 GWh no renovables
- 3100km de largo (Arica-Chiloé)

Sistema Eléctrico



<https://www.coordinador.cl/sistema-electrico/>

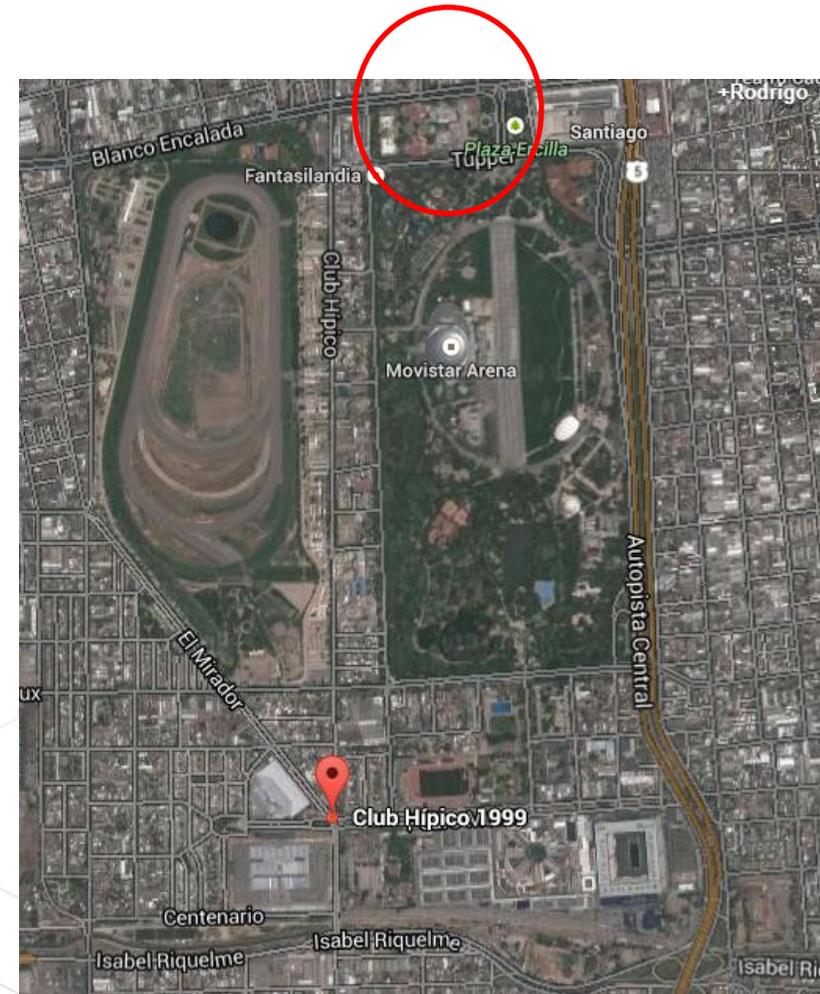
Sistema Eléctrico - Subtransmisión Santiago



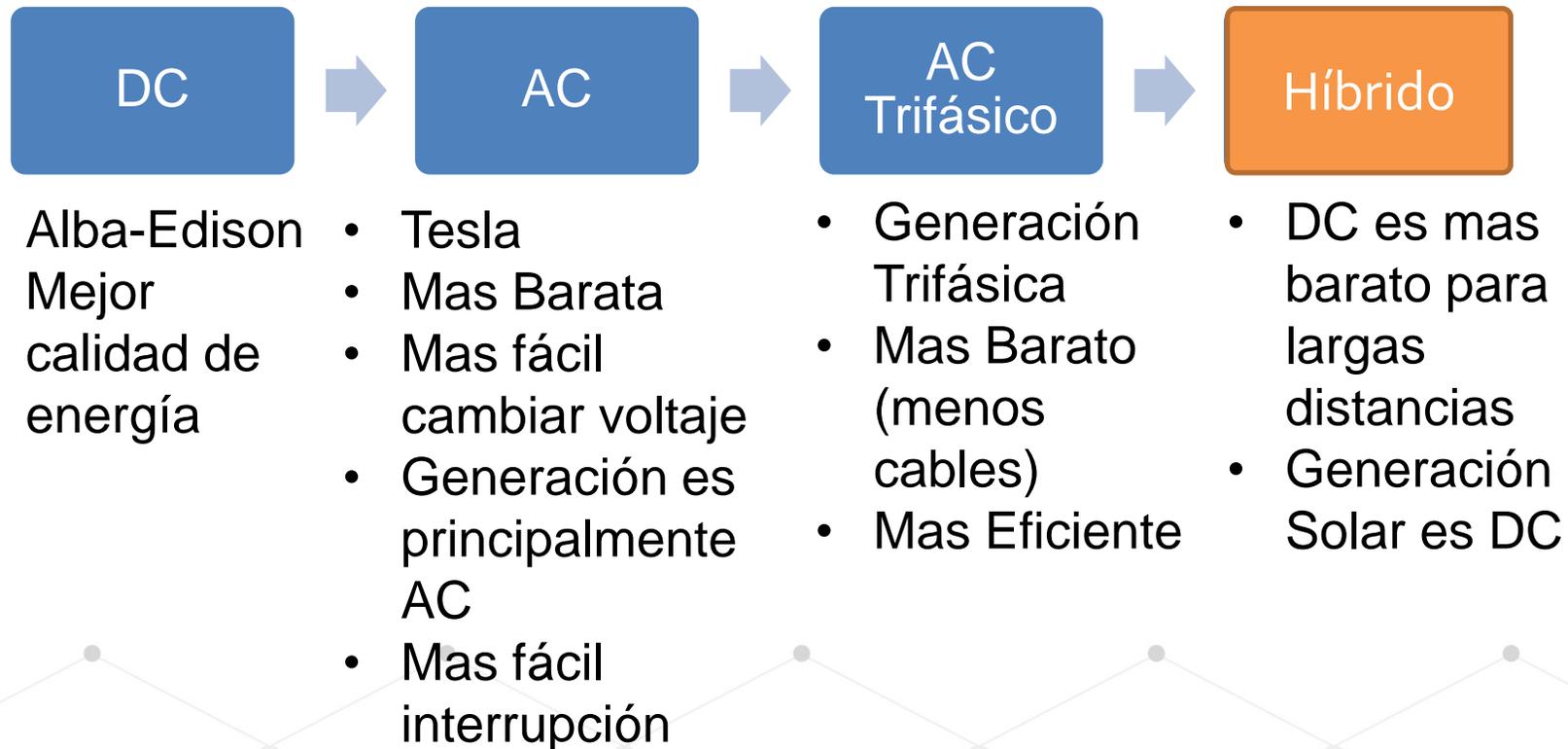
Sistema Eléctrico - Subestaciones



Sistema Eléctrico - Subtransmisión Santiago



Sistema Eléctrico - Trifásicos



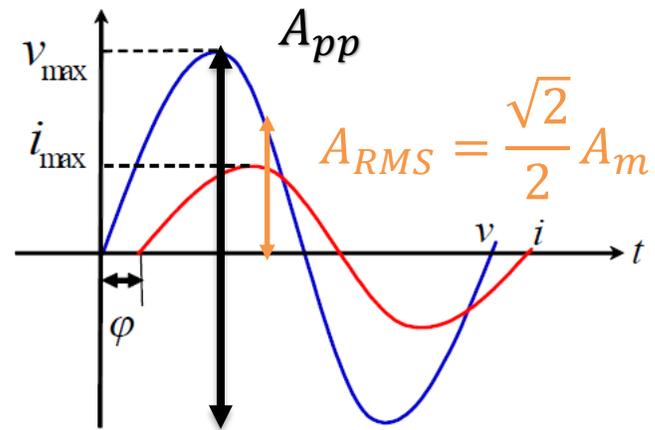
Sistema Eléctrico - Código de Colores



- Norma NCh Elec. 4/2003:
 - Conductor de la fase 1: Azul.
 - Conductor de la fase 2: Negro.
 - Conductor de la fase 3: Rojo.
 - Conductor de neutro o tierra de servicio: Blanco.
 - Conductor de protección: Verde o Verde/Amarillo.
- Si solo hay cables negros (secciones mayores a 21 mm^2) se debe marcar el cable cada 10 m.

Fasores

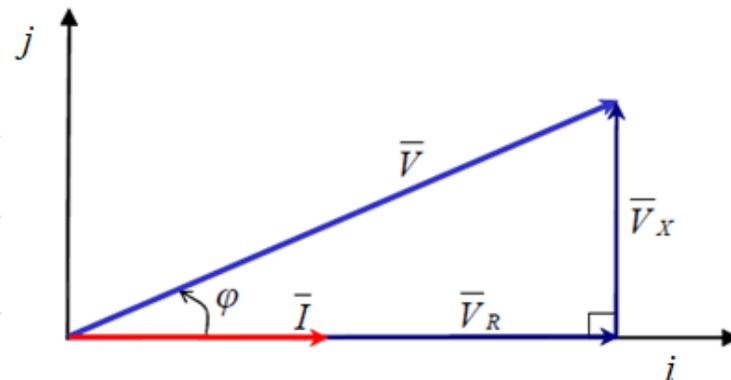
Onda: $A(t) = A_m \sin(\omega t + \phi)$



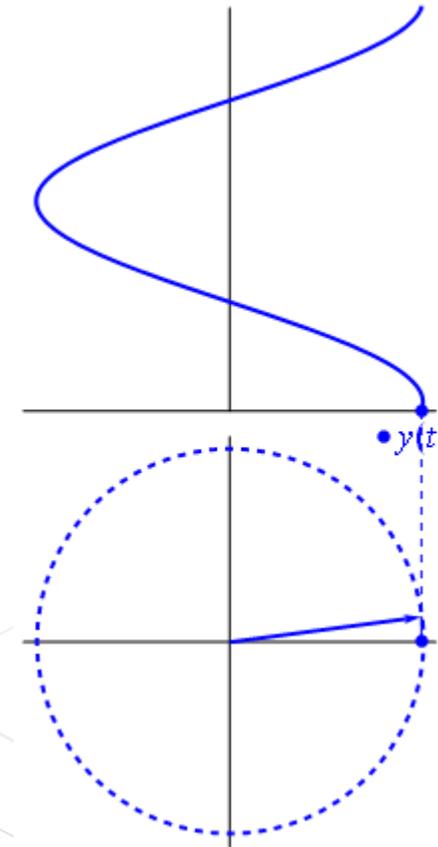
Tiempo

Fasor: $A_m \angle \phi$

$A_m [\cos(\phi) + j \sin(\phi)]$



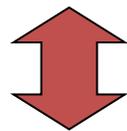
Fasor



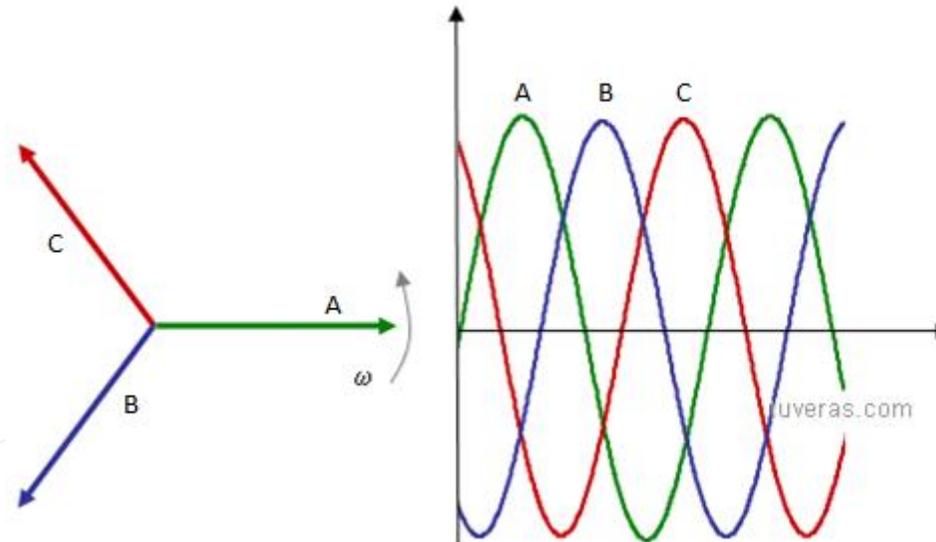
Secuencia

- Orden en el cual aparecen los fasores girando en sentido antihorario.
- Positiva: Orden A,B,C
- Negativa: C, B, A
- Cero: Simultáneo

- $V_{an} = V \angle 0^\circ$
- $V_{bn} = V \angle -120^\circ$
- $V_{cn} = V \angle +120^\circ$

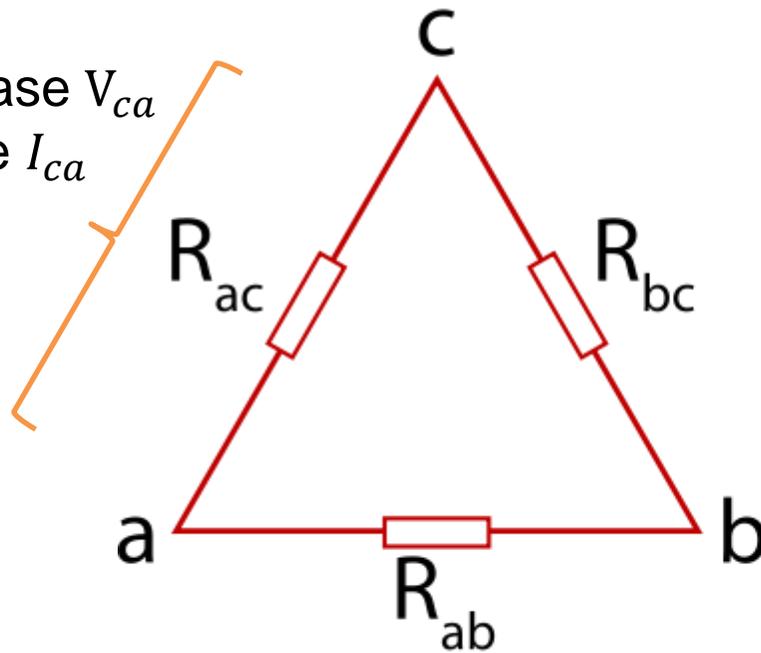


- $V_{ab} = \sqrt{3}V \angle 30^\circ$
- $V_{bc} = \sqrt{3}V \angle -90^\circ$
- $V_{ca} = \sqrt{3}V \angle +150^\circ$

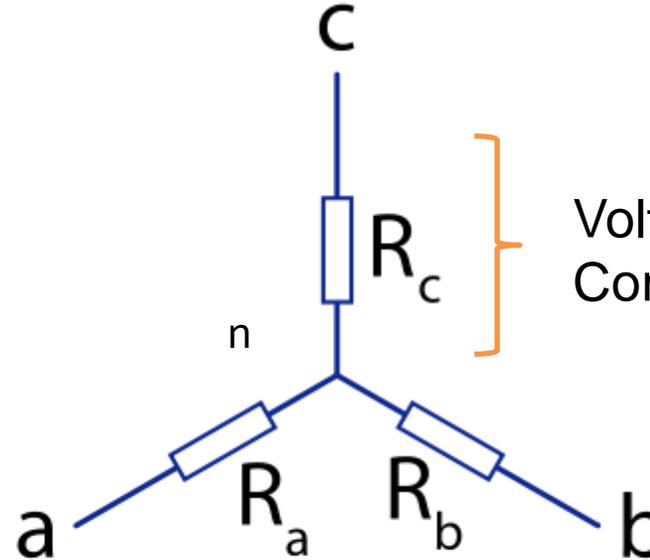


Conexiones

Voltaje fase-fase V_{ca}
Corriente fase I_{ca}



"Delta"



Voltaje fase-neutro V_{an}
Corriente línea I_a

"Estrella"

Transformaciones:

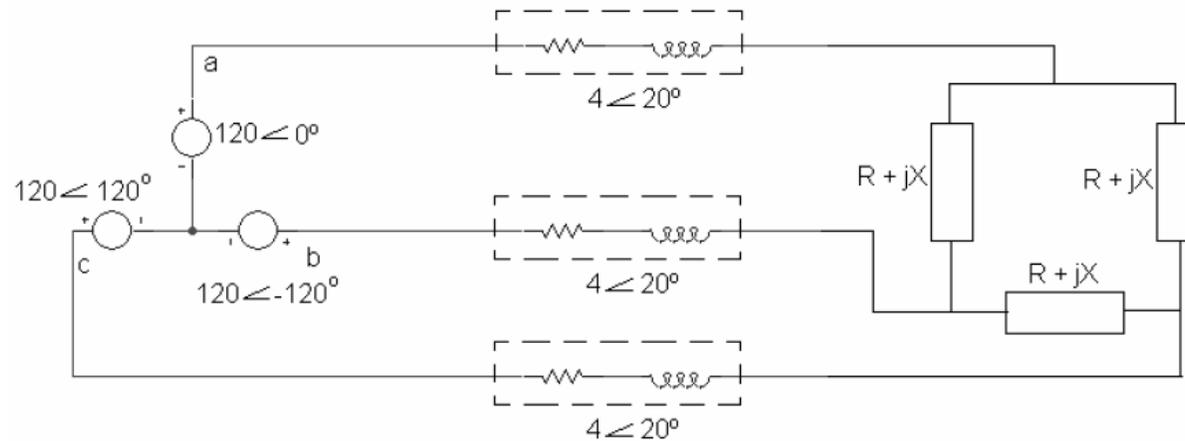
$$Z_Y = \frac{Z_\Delta}{3}$$

$$V_{ab} = \sqrt{3}V_{an} \angle 30^\circ \Rightarrow |V_{ab}| = \sqrt{3}|V_{an}|$$

$$I_a = \sqrt{3}I_{ab} \angle -30^\circ \Rightarrow |I_a| = \sqrt{3}|I_{ab}|$$

Sistemas Trifásicos Equilibrados

- Conexión entre generadores y cargas mediante una línea con impedancia Z
 - Delta – Delta - Delta – Estrella
 - Estrella – Delta - Estrella – Estrella \rightarrow equivalente 1ϕ



Estrella –
Delta

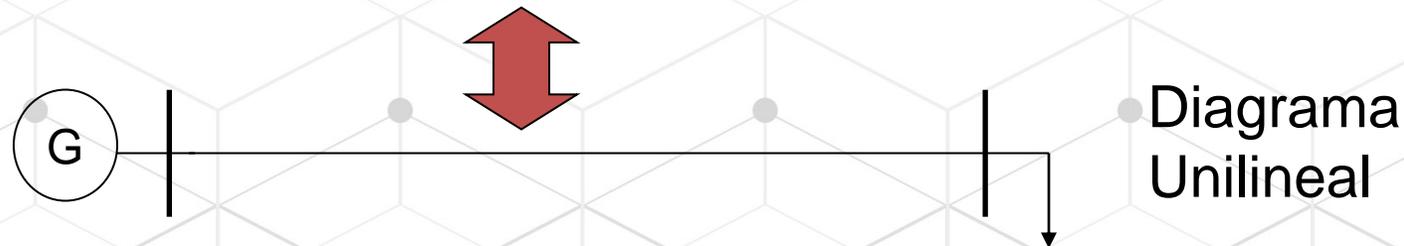
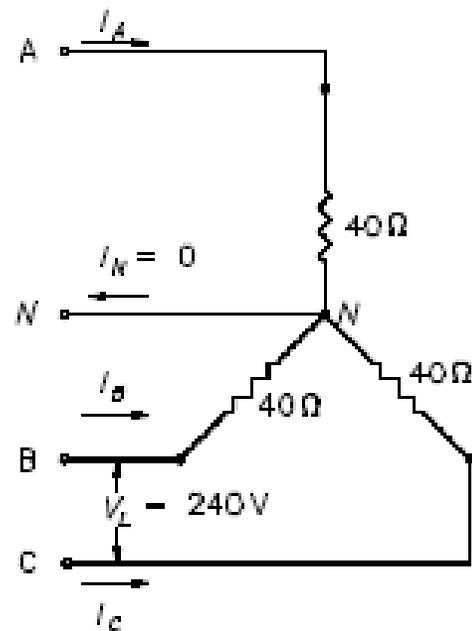
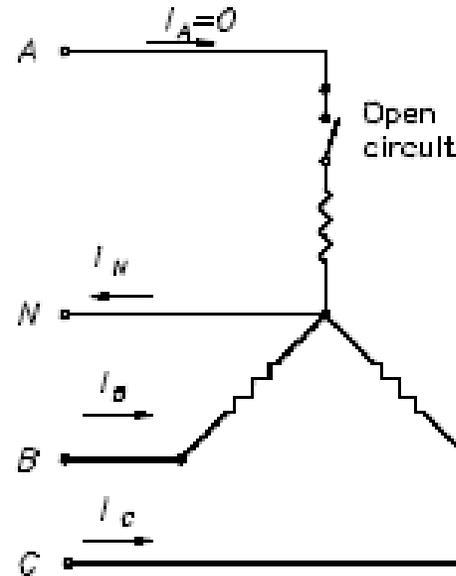


Diagrama
Unilineal

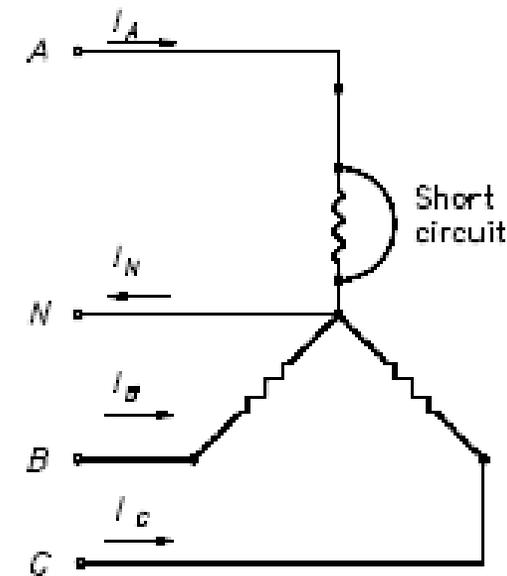
Sistemas Trifásicos Desequilibrados



(a) *Balanced 3 ϕ load, $I_N = 0$*



(b) *Unbalanced 3- ϕ load, open circuit, $I_N = I_B + I_C$*

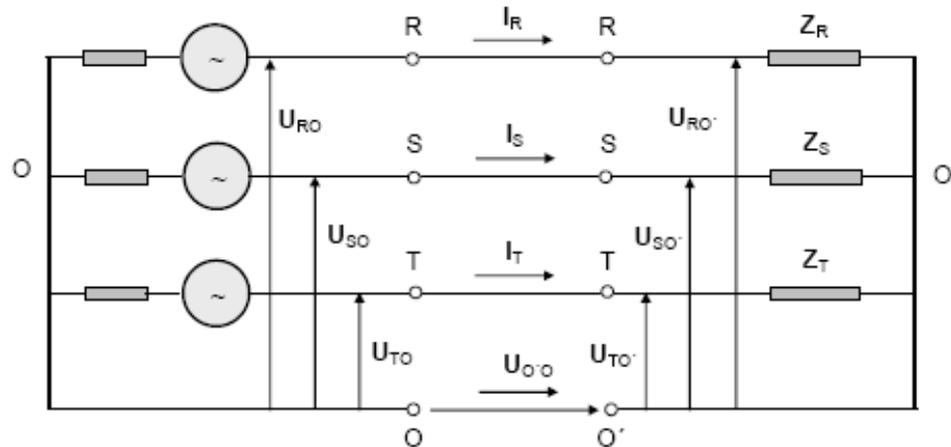


(c) *Unbalanced 3- ϕ load, short circuit, $I_N = I_A$*

Calcular ecuaciones usando:
 $A_m [\cos(\theta) + j \sin(\theta)]$

Hay circulación de corriente por el conductor neutro

Sistemas Trifásicos Desequilibrado sin neutro



$$I_R + I_S + I_T = 0$$

- Obligadamente, las tres corrientes suman cero.
- Se produce una diferencia de potencial entre los centros de la estrella del generador y del receptor.

Potencia

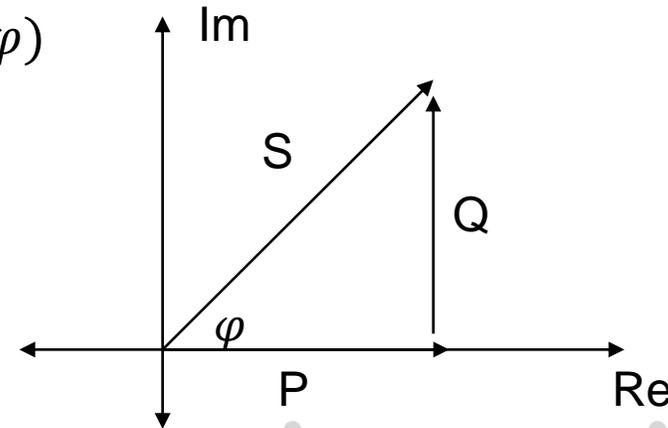
- Potencias y eficiencia en redes:

$$S = V \times I^* = P + jQ = |S| \cos(\varphi) + j|S| \sin(\varphi)$$

Potencia compleja
kVA

Potencia activa kW

Potencia reactiva
kVAR



La potencia compleja y la impedancia tienen el mismo ángulo y es menos (-) el ángulo de la corriente por la fase A

$$\cos(\varphi) = \frac{P}{|S|}$$

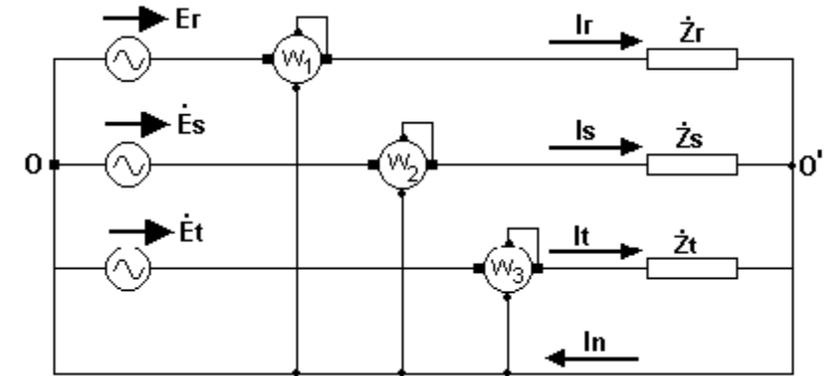
$\varphi > 0$ Inductivo, retraso (corriente)

$\varphi < 0$ capacitivo, adelanto (corriente)

Potencia - Medición

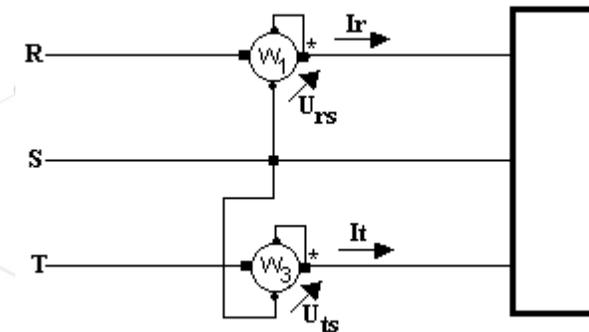
- Teorema de Blondell (Método de los 3 Wattmetro)

$$P = W_1 + W_2 + W_3$$



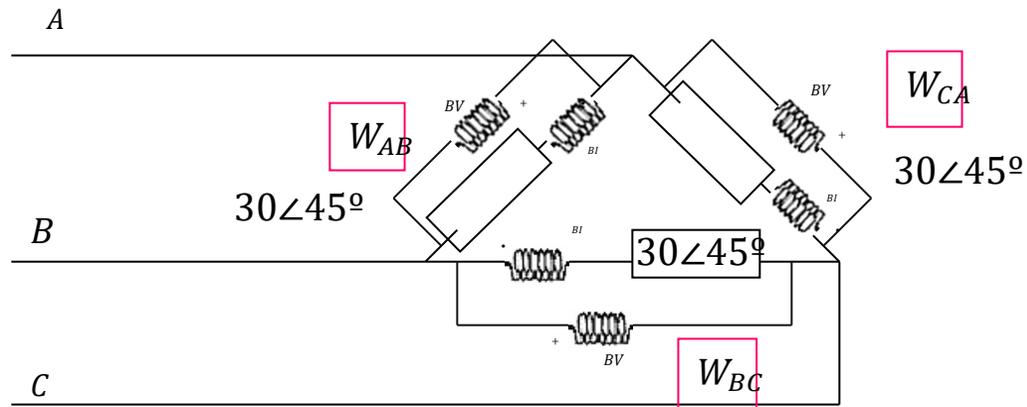
- Teorema de Aaron (Método de los 2 Wattmetro)

$$P = W_1 + W_2$$



Potencia - Medición

- $V_{an} = 120 V$



- El voltaje por fase es:

$$V_{ff} = 120\sqrt{3} = 208 V$$

- La corriente por fase es:

$$I_f = \frac{V_{ff}}{Z} = \frac{120\sqrt{3}}{30} = 6.93 A$$

Las potencias medidas son:

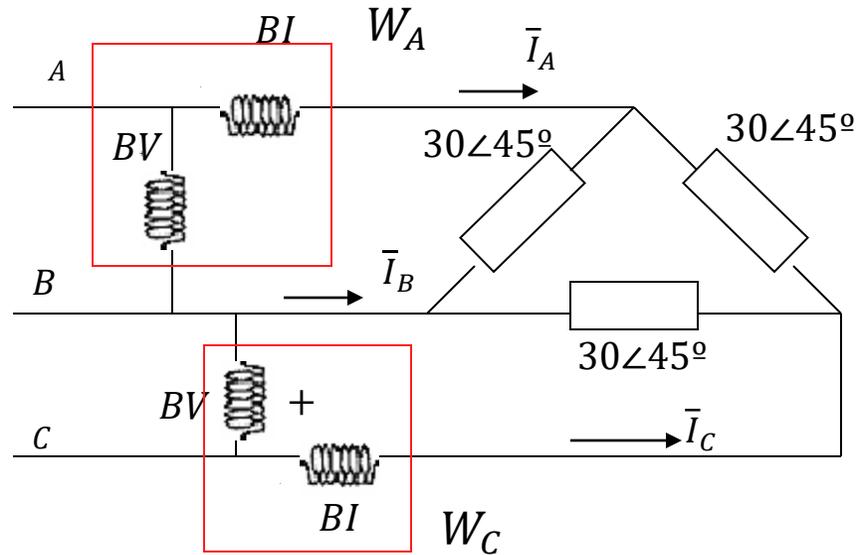
$$W_{AB} = V_{AB} I_{AB} \cos(\theta) = (208)(6.93) \cos(45^\circ) = 1019.25 W$$

$$W_{BC} = V_{BC} I_{BC} \cos(\theta) = (208)(6.93) \cos(45^\circ) = 1019.25 W$$

$$W_{CA} = V_{CA} I_{CA} \cos(\theta) = (208)(6.93) \cos(45^\circ) = 1019.25 W$$

$$W_{Total} = 3057W$$

Potencia - Medición



Referencia: línea B

$$W_A = \bar{V}_{AB} \bar{I}_A \cos(\theta_{\bar{V}_{AB}} - \theta_{\bar{I}_A})$$

$$W_A = (208)(12) \cos[30 - (-45)]$$

$$W_A = 646.01$$

$$W_C = \bar{V}_{CB} \bar{I}_C \cos(\theta_{\bar{V}_{CB}} - \theta_{\bar{I}_C})$$

$$W_C = (208)(12) \cos[+90 - 75]$$

$$W_C = 2410.95$$

$$W_T = W_A + W_C$$

$$W_T = 646.01 + 2410.95$$

$$W_T = 3057[W]$$

El voltaje por fase es:

$$V_{ff} = 120\sqrt{3} = 208 V$$

Contenido

Sistemas Trifásicos

Sistema Eléctrico
Fasores
Secuencias
C. Equilibrados
C. Desequilibrados
Medición de Potencia

Máquinas Eléctricas

Síncronas
Inducción
Corriente Continua DC

Contenido



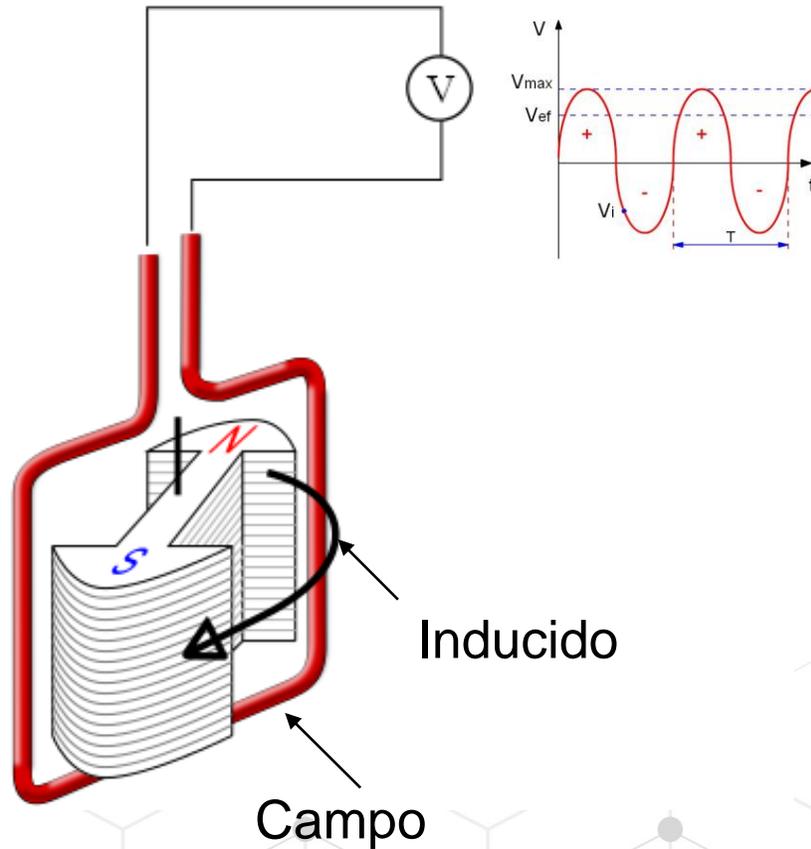
Conceptos Básicos

Síncronas

Inducción

Corriente Continua DC

Conceptos Básicos – Funcionamiento

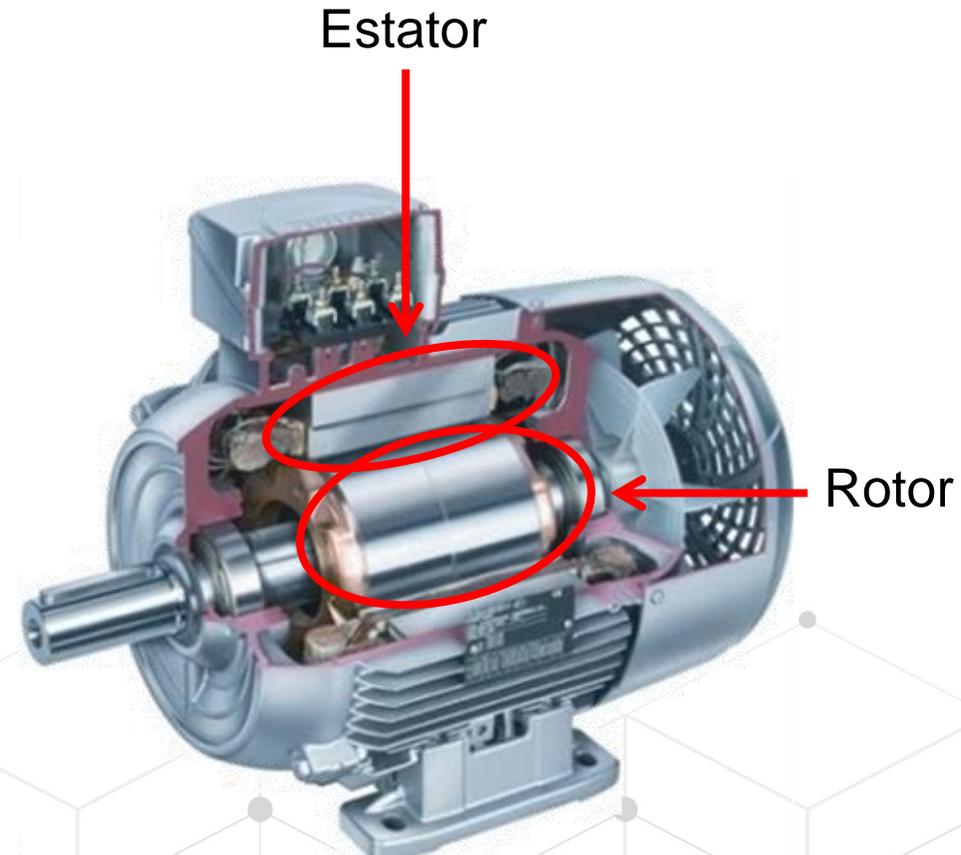
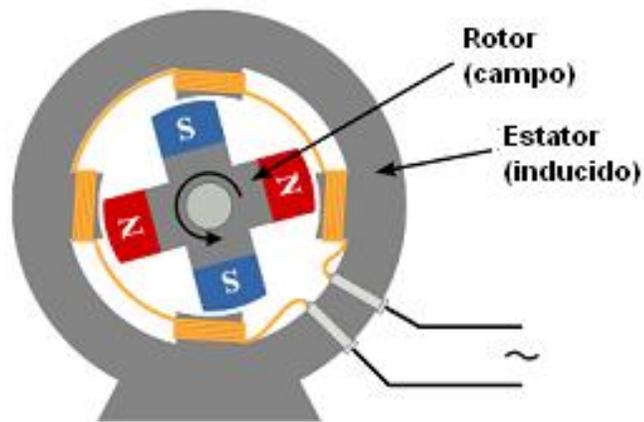


$$v(t) = V_{max} \cos(\omega t + \theta)$$
$$\omega = 2\pi f, T = \frac{1}{f}$$

$$V_{RMS} = \frac{V_{max}}{\sqrt{2}} = \frac{V_{max}\sqrt{2}}{2}$$

Conceptos Básicos – Partes Máquina

- Partes de las máquinas:
 - Estator
 - Rotor
 - Entrehierro
 - Campo
 - Inducido
 - Polos



Conceptos Básicos



Conceptos Básicos – Características

- Placa de características

SIEMENS			
PE•21 PLUS™		PREMIUM EFFICIENCY	
ORD. NO.	1LA02864SE41	FR.	
TYPE	RGZESD	FRAME	286T
H. P.	30.00	EFFICIENCY	1.15
AMPS	34.9	VOLTS	460
R.P.M.	1765	HERTZ	60
DUTY	CONT	40°C AMB.	
CLASS	F	NEMA DESIGN	B
SH. END	50BC03JPP3	OPR. END	50BC03JPP3
MILL AND CHEMICAL DUTY QUALITY INDUCTION MOTOR		MADE IN U.S.A.	

SIEMENS			
QUALITY INDUCTION MOTOR			
ORD. NO.	1LA04492DY62	FR.	K92
TYPE	RG	FRAME	449TS
H. P.	500	EFFICIENCY	1.15
AMPS	570	VOLTS	460
R.P.M.	1765	HERTZ	60
DUTY	CONT	40°C AMB.	3 PH
CLASS	F	NEMA DESIGN	B
SH. END	50BC03JPP3	OPR. END	50BC03JPP3
MILL AND CHEMICAL DUTY QUALITY INDUCTION MOTOR		MADE IN U.S.A.	

- Rendimiento:

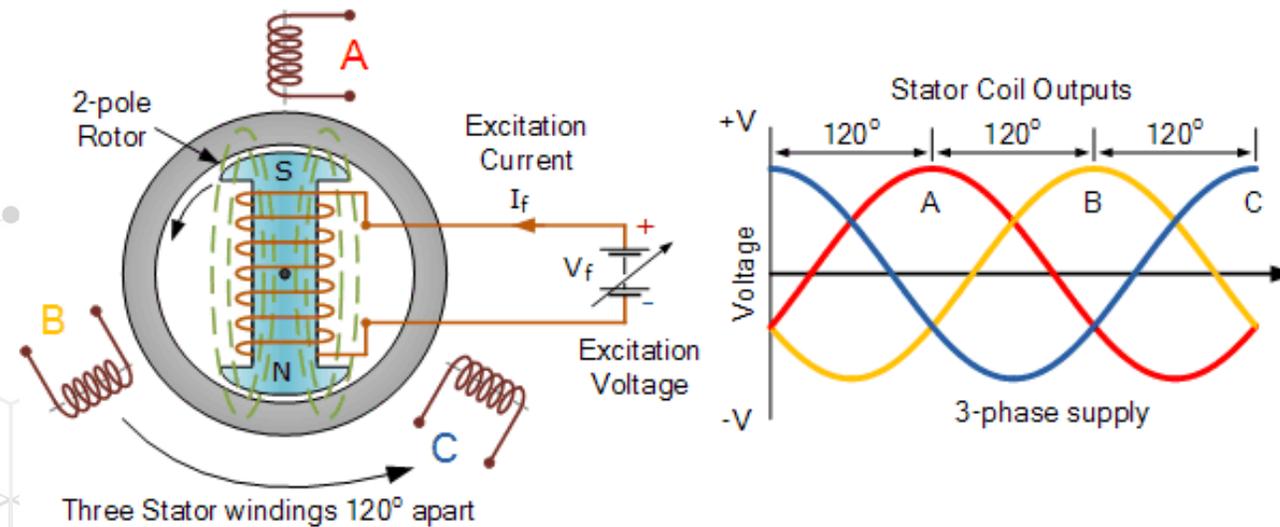
$$\eta = \frac{\text{Potencia útil}}{\text{Potencia absorbida}}$$

Conceptos Básicos – Tipos

	Corriente Continua	Corriente Alterna
Generadores	Generador DC (Dinamo)	Generador AC (Alternador) <ul style="list-style-type: none">▪ Inducción (Asíncronos)▪ Síncronos▪ Otros
Motores	Motor DC	Motor AC <ul style="list-style-type: none">▪ Inducción (Asíncronos)▪ Síncronos▪ Universales▪ Otros

Máquina Síncrona

- Aplicación: Principalmente generación.
- Campo: voltaje AC
- Rotor: Corriente continua o por imanes permanentes. La conexión se hace por medio de escobillas.



Video Máquina Síncrona: www.youtube.com/watch?v=Vk2jDXxZlhs

Máquina Síncrona

- El rotor se conecta a una fuente/carga mecánica de potencia y rota a una velocidad constante.
- La velocidad del rotor es la misma del campo magnético giratorio (armadura) y se denomina velocidad síncrona.
- La frecuencia (f) en [Hz] depende de la velocidad (n) en [rpm] y los polos (p):

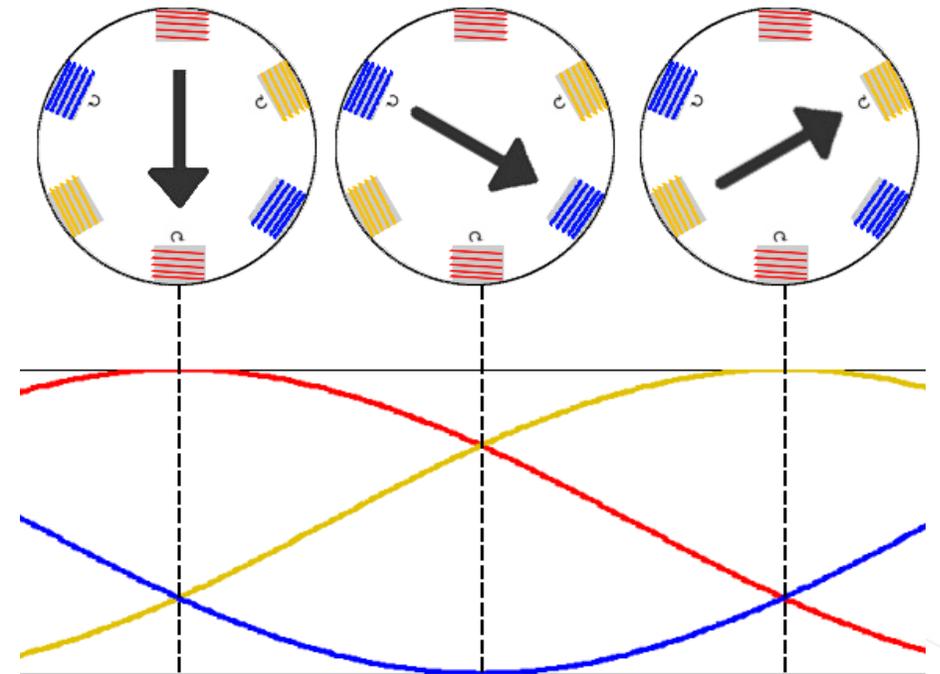
$$n = \frac{120f}{p}$$



Máquina de Inducción

- Aplicación: Principalmente Motor
- Motor trifásico:
 - En el estator se alojan tres bobinas, desfasadas entre si 120° .
 - Generan un campo magnético giratorio.
 - La velocidad del campo magnético giratorio n_s depende de la frecuencia f de la red eléctrica a la que esté conectado el motor y del número p de polos.

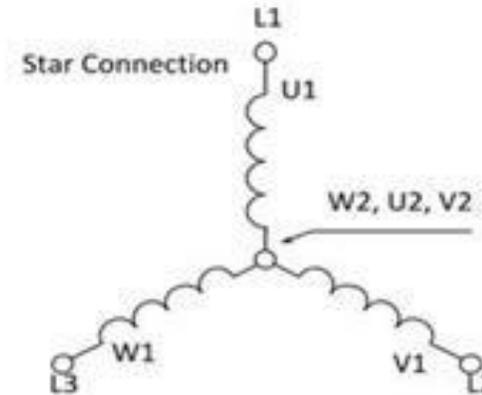
$$n_s = \frac{120 \cdot f}{p}$$



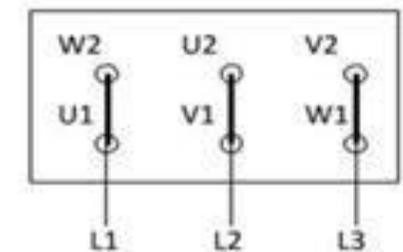
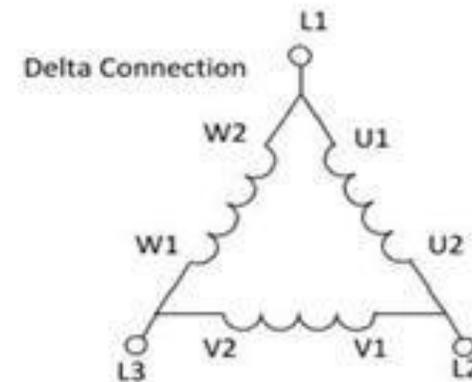
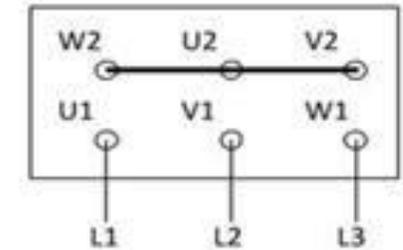
Video Máquina de Inducción: www.youtube.com/watch?v=LtJoJBUSe28

Máquina de Inducción – Estator

- Pueden conectarse en estrella o delta.
- En la placa dirá: 380/220 V
 - En estrella puede conectarse a 380V y cada devanado estará sometido a $380/\sqrt{3} = 220V$
 - En delta puede conectarse a 220V.
 - Un devanado estará siempre sometido a la tensión de 220V.



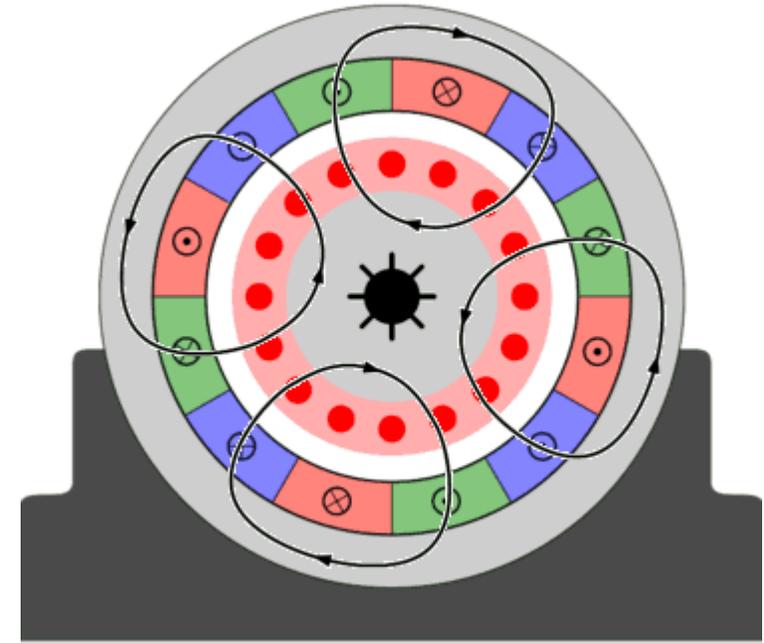
Terminal Connections



Máquina de Inducción – Rotor

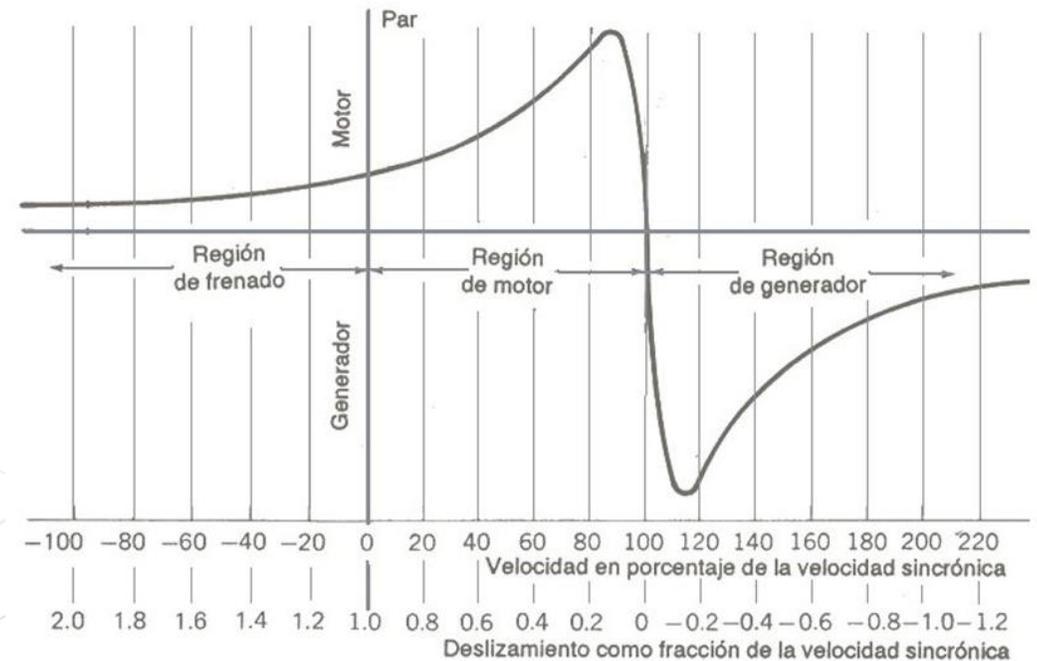
- Es la parte que gira.
- Al ser afectado por un campo magnético variable se generan en ellos F.E.M. que dan lugar a corrientes eléctricas.
- Estas obligan al rotor a moverse siguiendo al campo magnético.
- La velocidad de giro del rotor n es distinta a la velocidad de sincronismo n_s . La diferencia se llama deslizamiento:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} 100$$



Máquina de Inducción – Deslizamiento

- El deslizamiento varía con la carga y la operación:
 - En vacío el deslizamiento es mínimo.
 - En carga el rotor tiende a frenarse y el deslizamiento aumenta a unos valores en torno al 4%.
- Motor: velocidad menor a la de sincronismo.
- Generador: velocidad mayor a la de sincronismo.



Máquina de Inducción - Inercia

- El torque generado viene dado por:

$$T_{em} - T_{mec} = J \frac{d\omega}{dt}$$

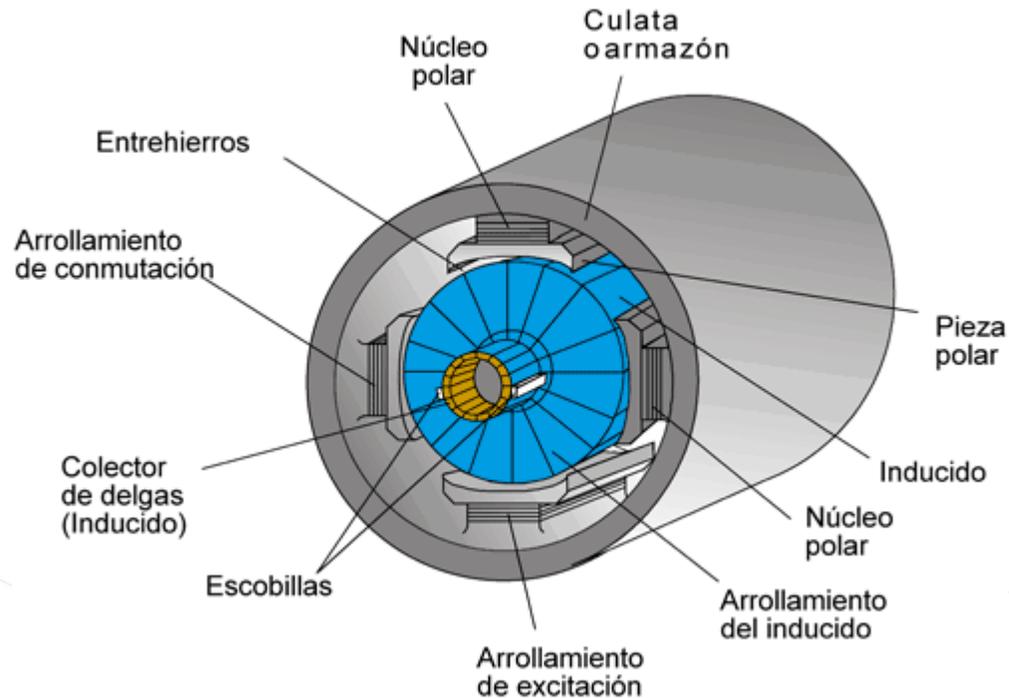
- Con:

- J : momento de inercia del rotor [$Kg m^2$]
- ω : velocidad del rotor en [rad/s]
- T_{em} : torque electromagnético en [Nm]
- T_{mec} : torque mecánico del motor en [Nm]

- En régimen permanente ω es constante, por lo que la ecuación anterior toma la forma:

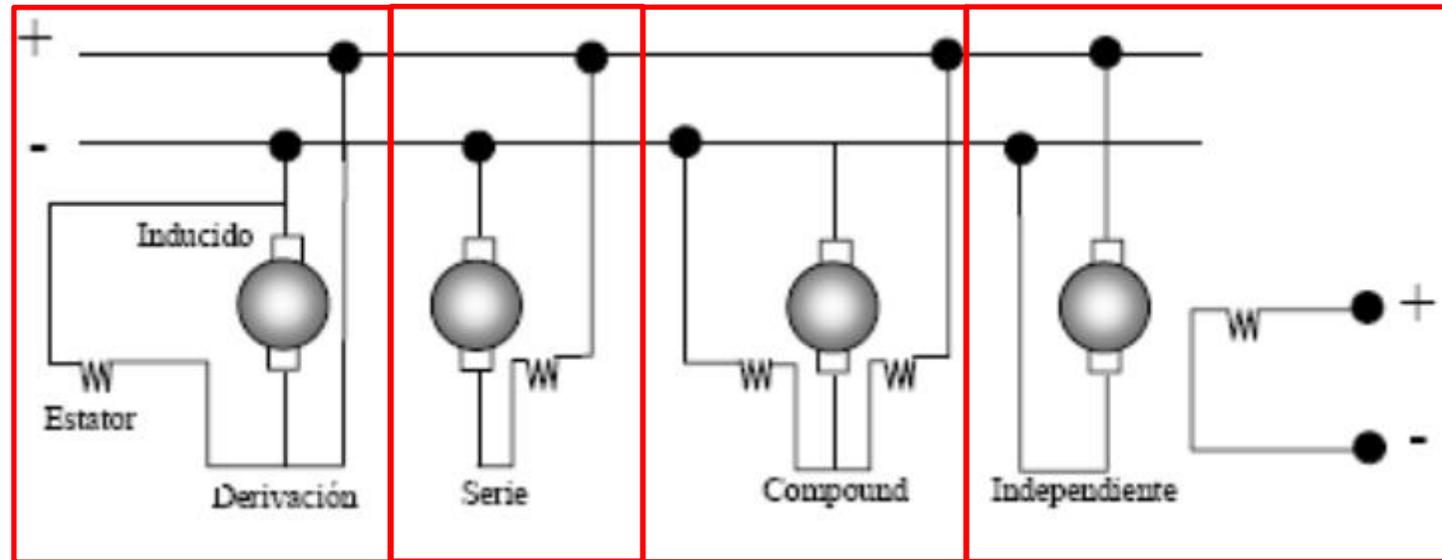
$$\begin{aligned} T_{em} - T_{mec} &= 0 \\ T_{mec} &= T_{em} \end{aligned}$$

Máquina DC



- Fuerza inducida:
$$E = k i_f i_a$$
- Con:
 - E : Voltaje inducido
 - i_f : corriente de campo
 - i_a : corriente de armadura
 - k : inductancia mutua

Máquina DC – Conexiones



Su control depende del tipo de conexión:

- Paralelo
- Serie
- Compound
- Independiente

Video Máquina DC:
www.youtube.com/watch?v=fWyzPdyCAzU

Máquinas – Comparación

	Síncrona	Inducción	DC
Ventajas	<ul style="list-style-type: none">• Buen control de velocidad• Más eficiente que inducción a alta potencia	<ul style="list-style-type: none">• Mas baratas que máquinas síncronas y DC.• Múltiples tamaños (0-10000HP)• Poca mantención	Fácil control de velocidad.
Desventajas	Mas caras y grandes que otras máquinas	<ul style="list-style-type: none">• Velocidad mas difícil de controlar y medir• Poco eficiente para bajas cargas.	<ul style="list-style-type: none">• Mantención (escobillas)
Aplicaciones	Generación	Motor Trifásico (industrial), Monofásico (hogar)	<ul style="list-style-type: none">• Motor• Grandes variaciones de velocidad.

Referencias



- Romo, J., Valdenegro, A. “*Máquinas de Inducción Trifásicas*”. DIE, Universidad de Chile, 1982.
- Crowder, R, “Electric Drives and Electromechanical Systems”, Newnes, 1st edition, 2006

EL 3003

Laboratorio de Ingeniería Eléctrica

Clase 3

Maquinas Eléctricas y Trifásicos

Profesor: Dr. Carlos Navarro C.
Departamento de Ingeniería Eléctrica
Universidad de Chile

Basado en las clases de la profesora
Dra. Constanza Ahumada.