



3. Las componentes de los sistemas eléctricos de potencia

3.1 Introducción

3.2 Generador Sincrónico

3.3 Líneas de Transmisión

3.4 Transformadores

3.5 Redes de Transmisión y Subestaciones

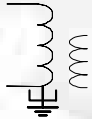
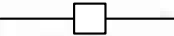
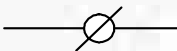
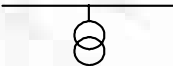
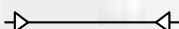


Introducción (I)

Equipo	Símbolo Europeo	Americano
Reactor, Bobina		
Transformador 3 ϕ de dos enrollados separados		
Transformador 3 ϕ de tres enrollados separados		
Transformador 1 ϕ de dos enrollados		
Transformador 3 ϕ , conexión estrella-delta		
Transformador de corriente		
Transformador con derivaciones		

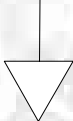
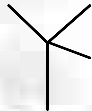
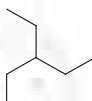
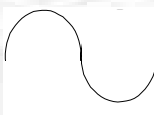


Introducción (II)

Equipo	Símbolo Europeo	Americano
Autotransformador		
Interruptor		
Desconectador		
Desconectador Fusible		
Reconectador		
Transformador de medida de tensión		
Pararrayos		
Cable de Poder		

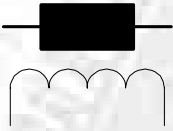
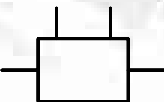
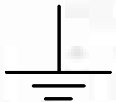


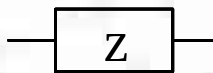
Introducción (III)

Equipo	Símbolo	Equipo	Símbolo
Generador		Posibilidad de variar bajo carga	
Consumo		Posibilidad de posicionar	
Conexión Delta		Conexión T	
Conexión Delta abierta		Conexión Estrella con Neutro	
Conexión Estrella		Conexión Estrella-Delta	
Conexión Zig-Zag		Conductor genérico	
C-C		C-A	
Alternativa para C-C		Conexiones	



Introducción (V)

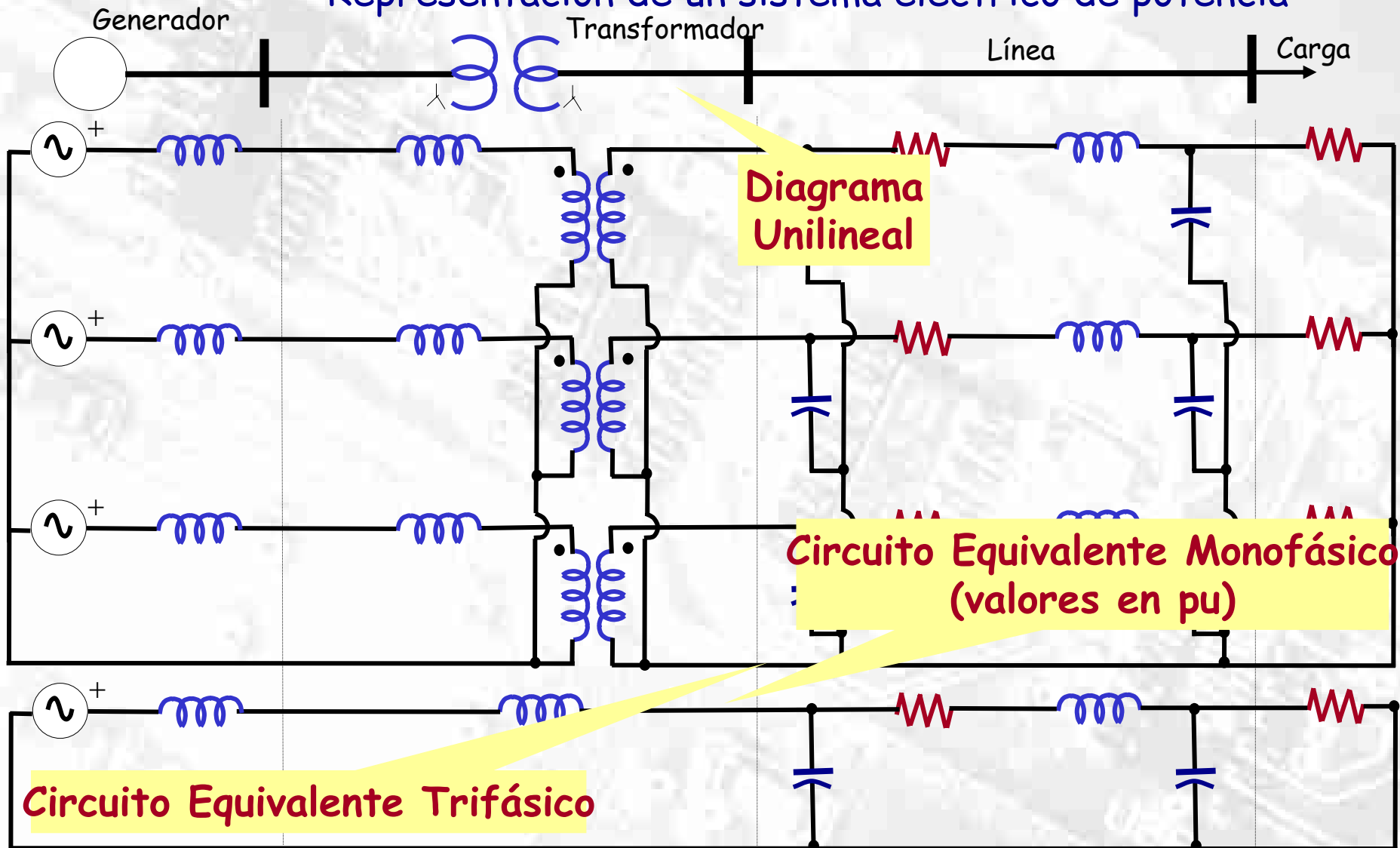
Equipo	Símbolo
Línea con 3 conductores	
Inductancia, bobina	
Impedancia fija	
Tierra	

Equipo	Símbolo
Resistencia	
Impedancia $R+jX$	
Condensador, Capacidad	
Batería, Acumulador	



Introducción (VI)

Representación de un sistema eléctrico de potencia

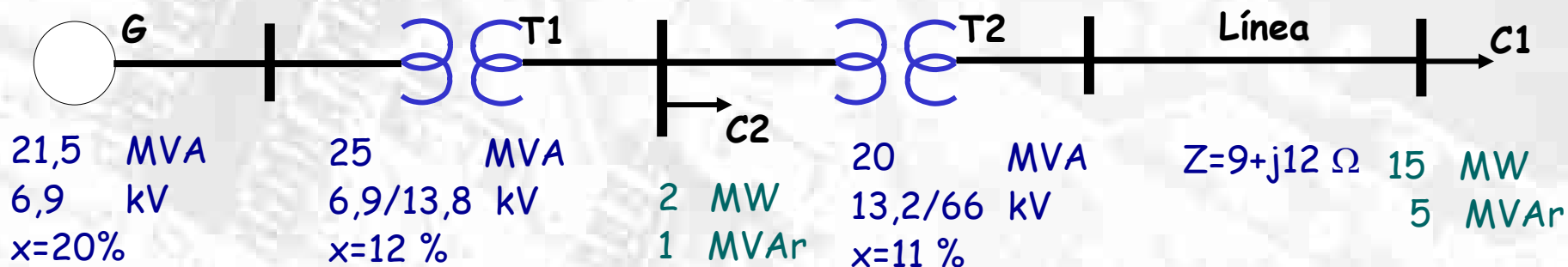


3. Las componentes de los sistemas eléctricos de potencia



Introducción (VII)

Ejemplo de Aplicación



Calcular tensión en bornes del generador, tal que tensión en carga principal sea 95%
(Trabajar con $SB=20$ MVA)



Necesidad de Modelar Componentes

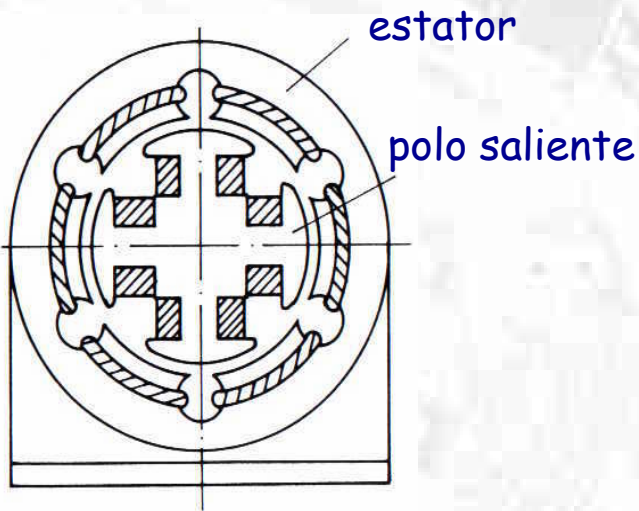
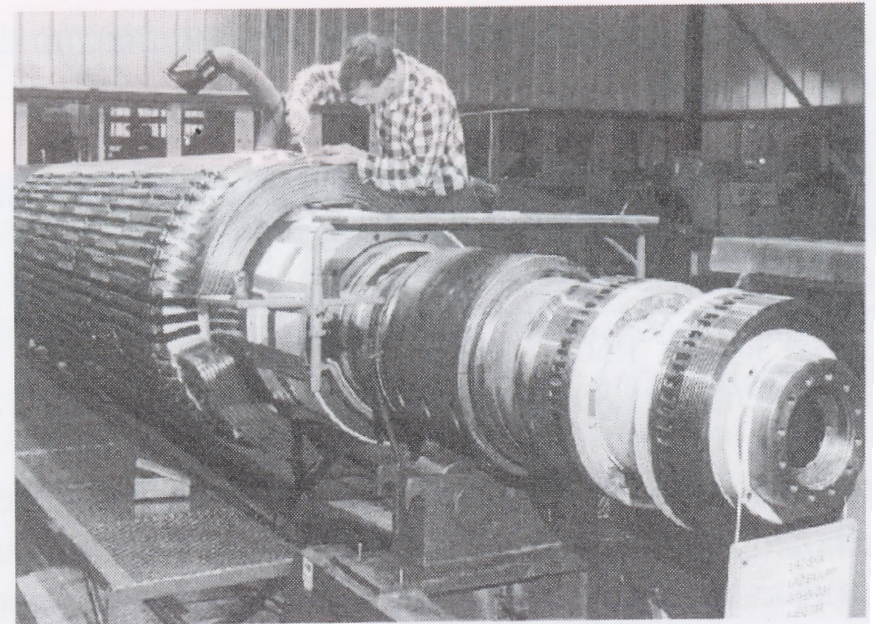
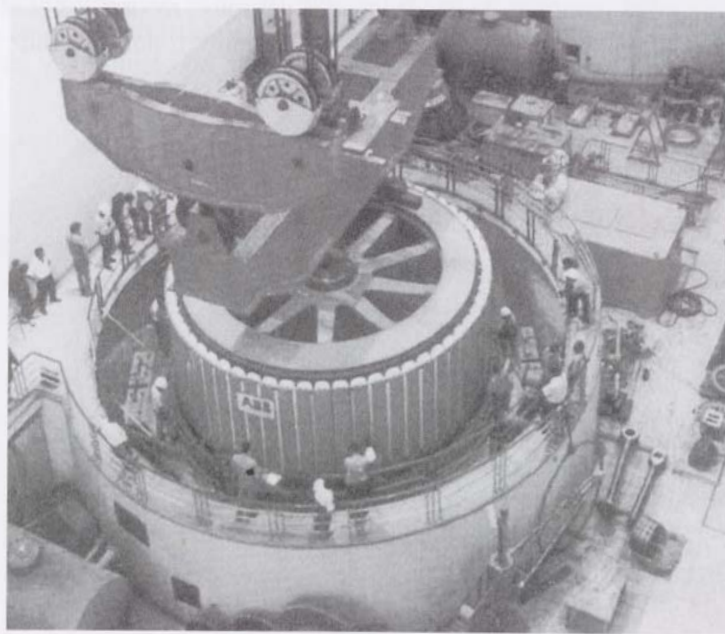
- Estructura General
- Modelo de Operación en Régimen Normal
- Modelo de Operación ante Perturbaciones

Criterios de Modelación

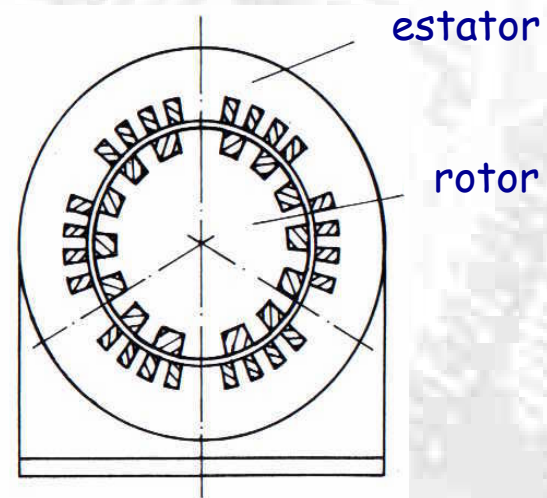
- Explicar comportamiento de equipos desde el punto de vista del Sistema (visto desde los bornes correspondientes)
- Precisión de modelos ajustada a condiciones de operación especificadas:

Cuasiestacionario, estático: Modelos lineales, monofásicos, parámetros concentrados

Comportamiento dinámico, fenómenos transientes : Modelos no lineales, representación de cada fase



Máquina de Polos Salientes



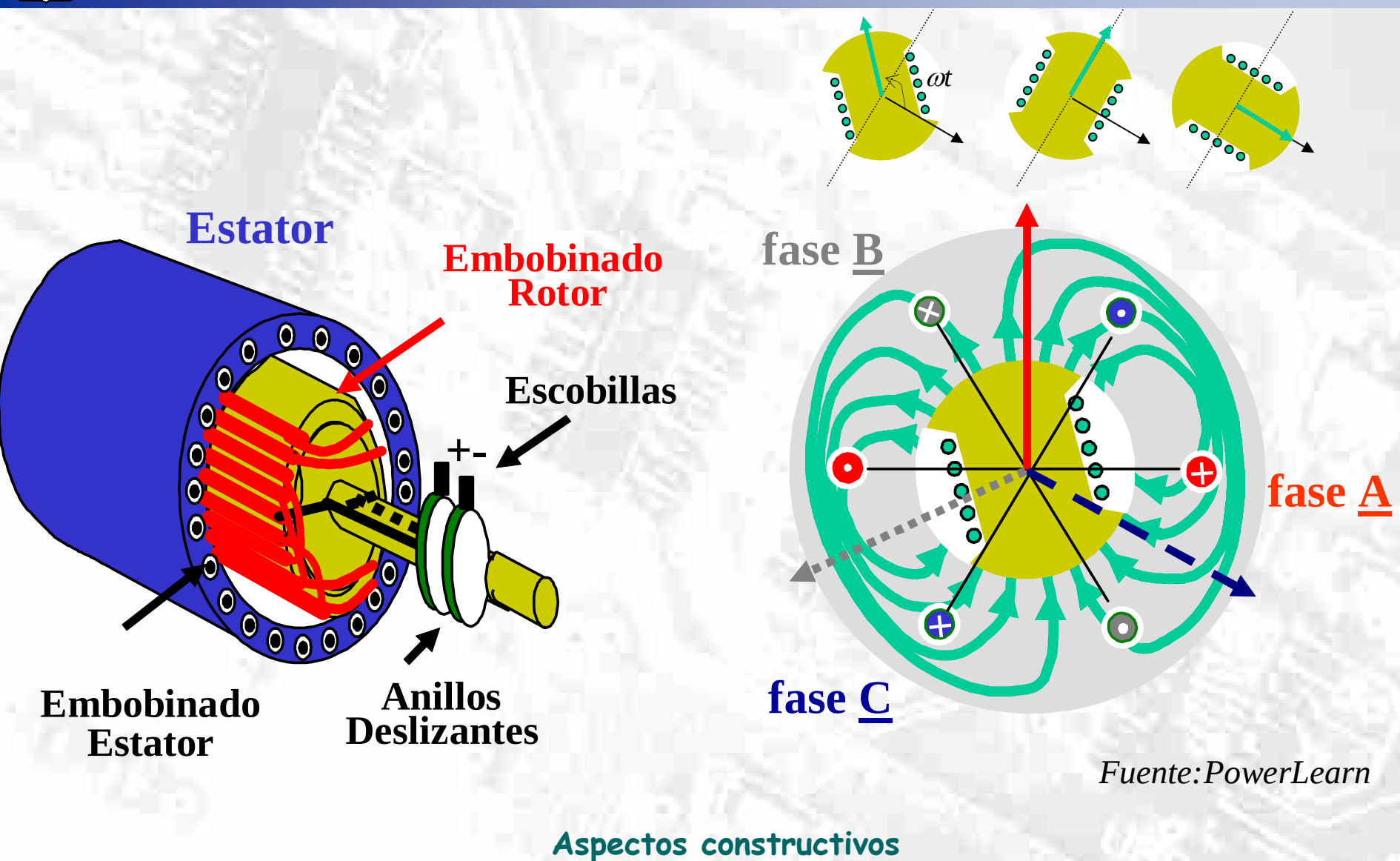
Máquina de Rotor Cilíndrico

Fuente: UNIDO

3. Las componentes de los sistemas eléctricos de potencia

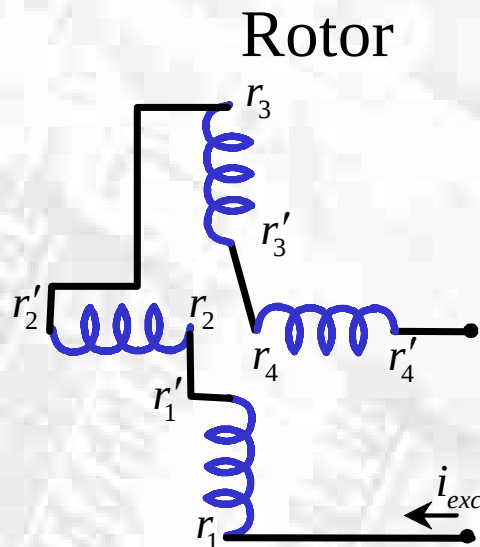
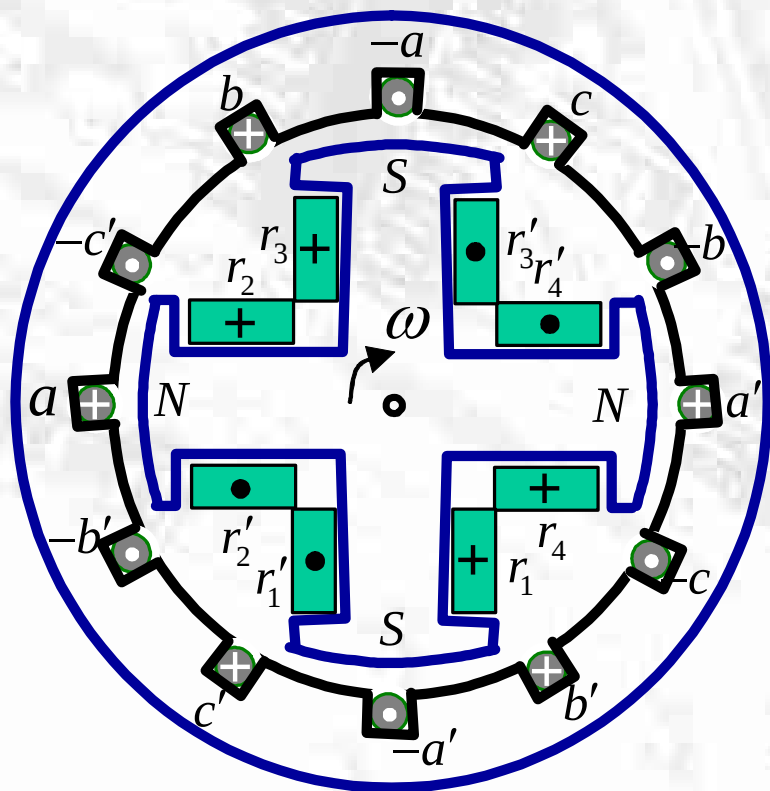


Generador Sincrónico(II)

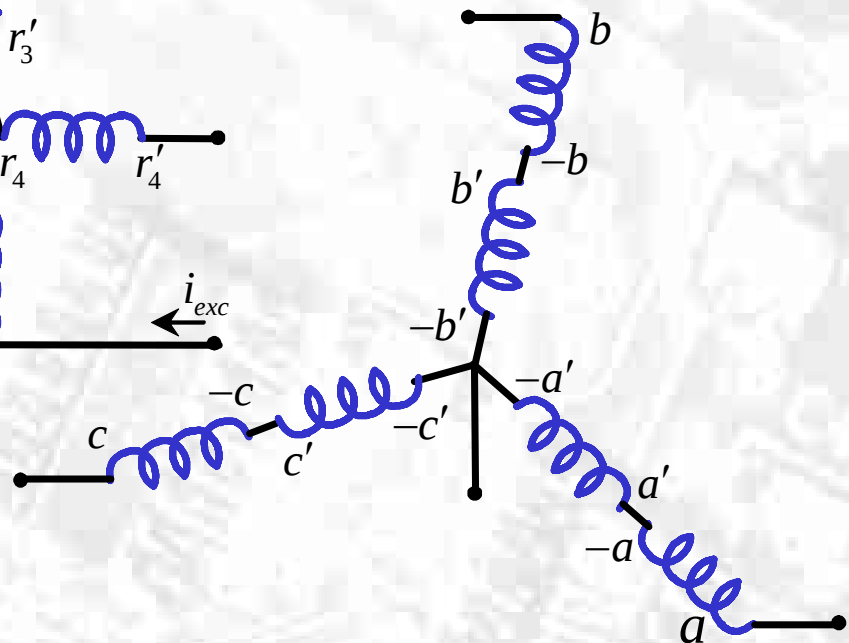




Generador Sincrónico(III)



Estator



Conexión Serie de Bobinas en
Máquina de 2 pares de polos



Generador Sincrónico(IV)

- Rotor genera un campo rotatorio -> pasa al estator a través del entrehierro o separación de aire.
- Al girar el rotor (campo) con velocidad n (rpm o rev/min) o velocidad angular ω_m
 - > inducirán tensiones senoidales de frecuencia angular ω ($2\pi f$) en conductores de la armadura

$$n = \frac{\omega_m}{2\pi} 60 \quad \text{Caso 1 par de polos} \quad \longrightarrow \quad n = \frac{\omega}{2\pi} 60 = f 60 [\text{rpm}]$$

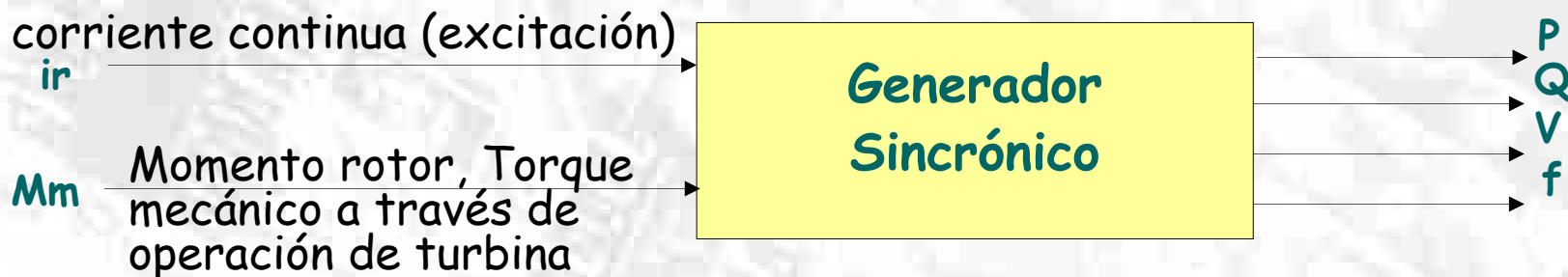
- Para $f=50$ Hz --> 3000 (rpm)!!! (máquinas hidráulicas operan en rango 150 a 500 rpm)
- Solución --> incrementar número de pares de polos (p) utilizando el hecho de que:

$$\omega = p \omega_m \quad \longrightarrow \quad n = \frac{\omega}{2\pi p} 60 = \frac{f}{p} 60 [\text{rpm}]$$

- Al considerar una carga trifásica conectado al devanado del estator
 - > circula una corriente de frecuencia f --> frecuencia de red y velocidad de giro relacionadas en forma fija.



Comportamiento Dinámico del Generador



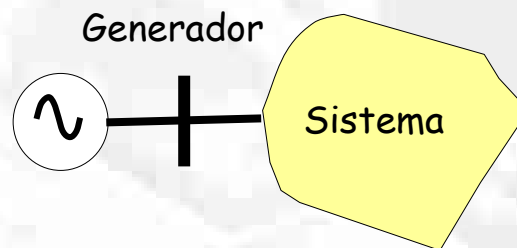
- Necesidad de simplificaciones para tratar relaciones existentes entre las variables de control y de salida. Dos casos extremos:

- 1.- Generador conectado a barra infinita
- 2.- Generador conectado a impedancia única



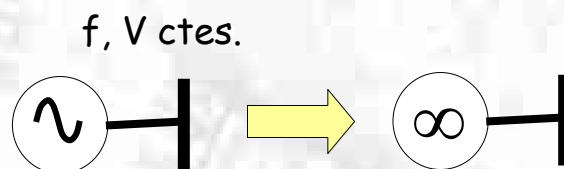
Generador Sincrónico(VI)

1.- Generador conectado a barra infinita

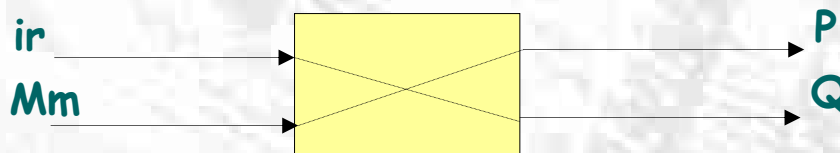
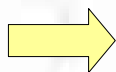


- **Barra Infinita:** es un sistema eléctrico tan grande que para todos los efectos eléctricos es equivalente a un generador síncrono de inercia infinita.

→ $f = cte.$
 $V = cte.$



- Variación de M_m cambia en forma mínima frecuencia de red.
- Voltaje constante V en bornes del generador --> no controlable por i_r

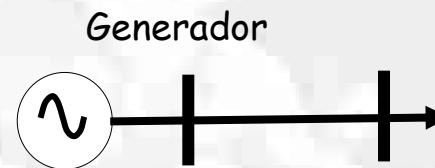


3. Las componentes de los sistemas eléctricos de potencia

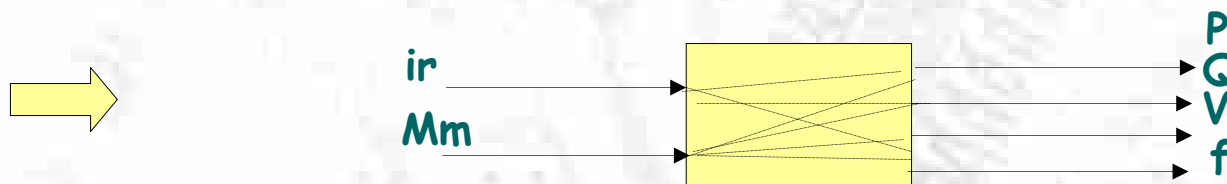


Generador Sincrónico(VII)

2.- Generador conectado a impedancia única (operación en isla)



- Aumento M_m --> aceleración rotor --> aumento frecuencia
- Aumento M_m --> aceleración rotor --> crece voltaje inducido -> Potencia activa, Potencia reactiva
- Aumento i_r --> aumento voltaje en bornes --> influencia sobre Potencia Activa y Potencia Reactiva



3. Las componentes de los sistemas eléctricos de potencia

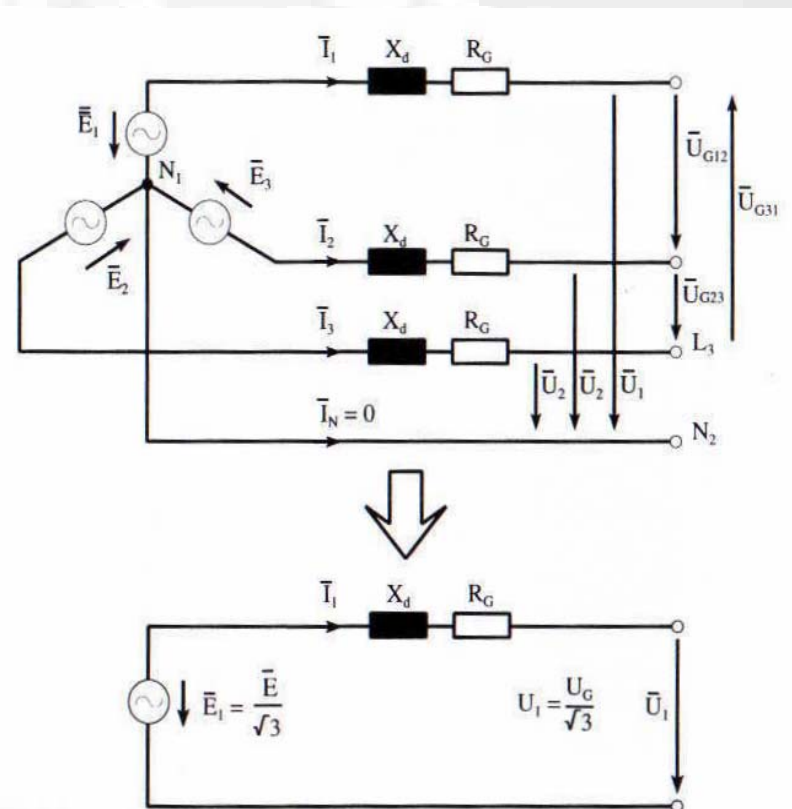


Generador Sincrónico(IX)

Modelo Equivalente en Estado Estacionario

- Para deducción de circuito equivalente es conveniente estudiar las relaciones de campo en separación de aire.
- Tres campos principales desfasados temporalmente en 120° --> campo rotatorio en entrehierro a frecuencia f --> corresponde con velocidad de giro de la turbina.
- Desfase δ entre campo rotatorio en estator y rotor (no existe velocidad relativa !!!). Angulo de potencia, de carga, de torque.
- Simetría en construcción --> cada bobina supone una inductancia principal igual L_h y distribuida L_σ . Como consecuencia de lo anterior se puede definir:

$$L_d = L_h + L_\sigma \longrightarrow X_d = X_h + X_\sigma$$



Circuito Equivalente Trifásico y Monofásico

Fuente: UNIDO



Resistencia de Bobina
 en la mayoría de los casos
 se desprecia:

- Pérdidas óhmicas en embobinados de Estator y Rotor
- Pérdidas de hierro en el Estator (c. parásitas, histéresis)

$$P_{\Omega} \propto I^2$$

$$P_{Fe} \propto P_W + P_H$$

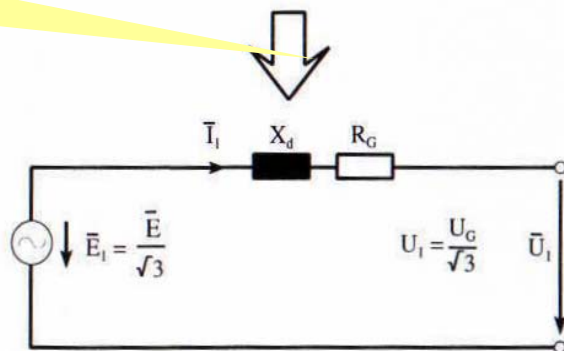
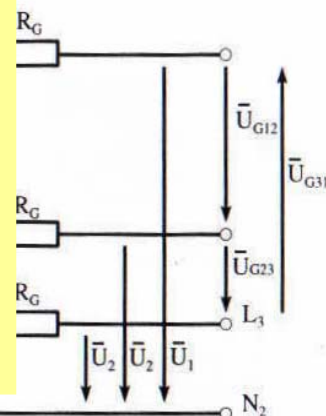
- Desfase δ entre campo rotatorio y rotor (no existe velocidad relativa $\rightarrow$ ángulo de potencia, de carga, de torque)

- Simetría en construcción $\rightarrow$ bobina supone una inductancia principal L_h y distribuida L_{σ} . Como consecuencia de lo anterior se puede definir:

$$L_d = L_h + L_{\sigma} \longrightarrow X_d = X_h + X_{\sigma}$$

s)
 ísticas
 1a.
 e.

)



Circ **$X_{\sigma} = (0,07 \dots 0,2) X_h$** ásico y
 Monofásico

Fuente: UNIDO



Generador Sincrónico(X)

Puntos de Operación en Estado Estacionario

- Diagrama fasorial en estado estacionario para caso de conexión a barra infinita $\rightarrow U_N$, f indep. de I_G
- De la geometría del diagrama fasorial se deduce (valores en pu):

$$\star e \sin \delta = x_\delta i_G \cos \varphi$$

$$\star p_G = u_N i_G \cos \varphi$$

$$e \cos \delta - u_N = x_\delta i_G \sin \varphi$$

$$\star q_G = u_N i_G \sin \varphi$$

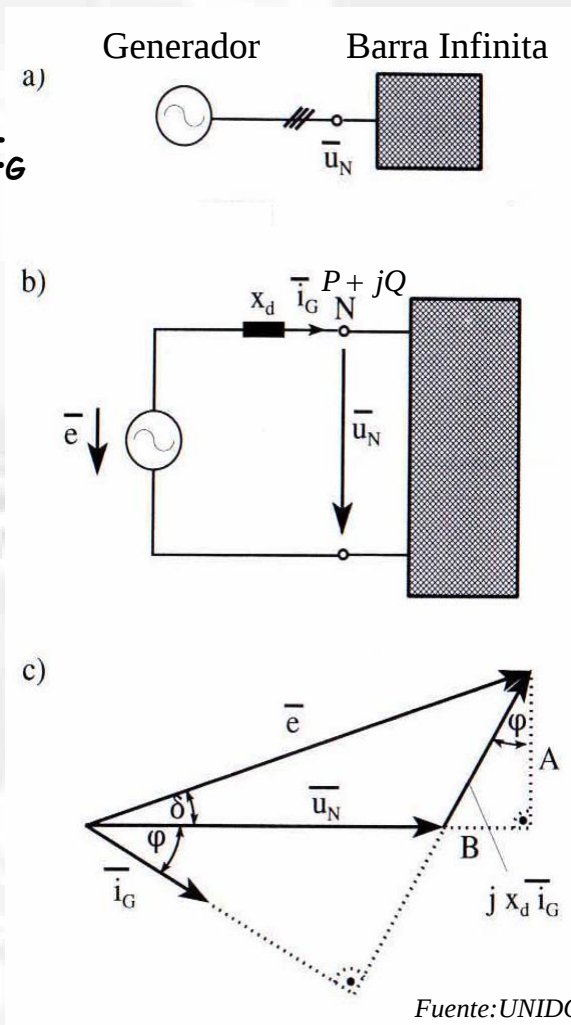
$$\Rightarrow i_G \cos \varphi = \frac{e \sin \delta}{x_\delta} \quad \Rightarrow p_G = \frac{e u_N}{x_\delta} \sin \delta$$

$$i_G \sin \varphi = \frac{e \cos \delta - u_N}{x_\delta} \quad q_G = \frac{e u_N}{x_\delta} \cos \delta - \frac{u_N^2}{x_\delta}$$

- En magnitudes físicas

$$P_G = \frac{E U_N}{X_\delta} \sin \delta = \omega_m M_G$$

$$Q_G = \frac{E U_N}{X_\delta} \cos \delta - \frac{U_N^2}{X_\delta}$$



Máquina síncrona conectada a barra infinita



Generador Sincrónico(X)

Puntos de Operación en Estado Estacionario

- Diagrama fasorial
caso de conexión

- De la geometría
se deduce (valores en pu):

operación en vacío --> $\delta=0$

$\delta>0$ aumenta carga en el sistema

$\delta<0$ operación como motor (centrales de bombeo)

$$e \sin \delta = x_d i_G \cos \varphi$$

$$e \cos \delta - u_N = x_d i_G \sin \varphi$$

$$p_G = u_N i_G \cos \varphi$$

$$q_G = u_N i_G \sin \varphi$$

Si U_N y E son ctes. --> P_G varía con δ

$$i_G \cos \varphi = \frac{e \sin \delta}{x_d}$$

$$p_G = \frac{e u_N}{x_d} \sin \delta$$

$$q_G = \frac{e u_N}{x_d} \cos \delta - \frac{u_N^2}{x_d}$$

Condición para absorber o generar reactivos

$Q<0$ --> máquina subexcitada

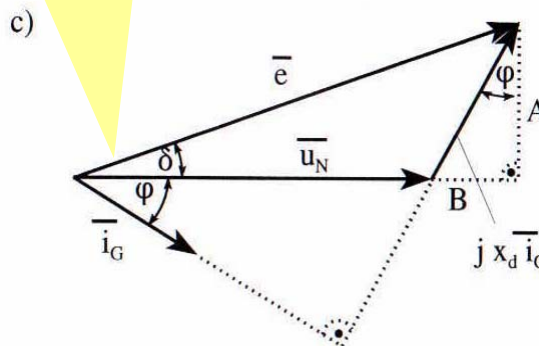
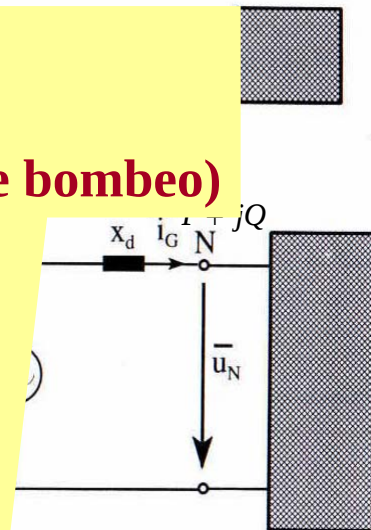
$Q>0$ --> máquina sobreexcitada

$$\frac{U_N}{X_d} \sin \delta = \omega_m M_G$$

$$Q_G = \frac{E U_N}{X_d} \cos \delta - \frac{U_N^2}{X_d}$$

Generador

Barra Infinita



Fuente: UNIDO

Máquina síncrona conectada a barra infinita



Generador Sincrónico (X)

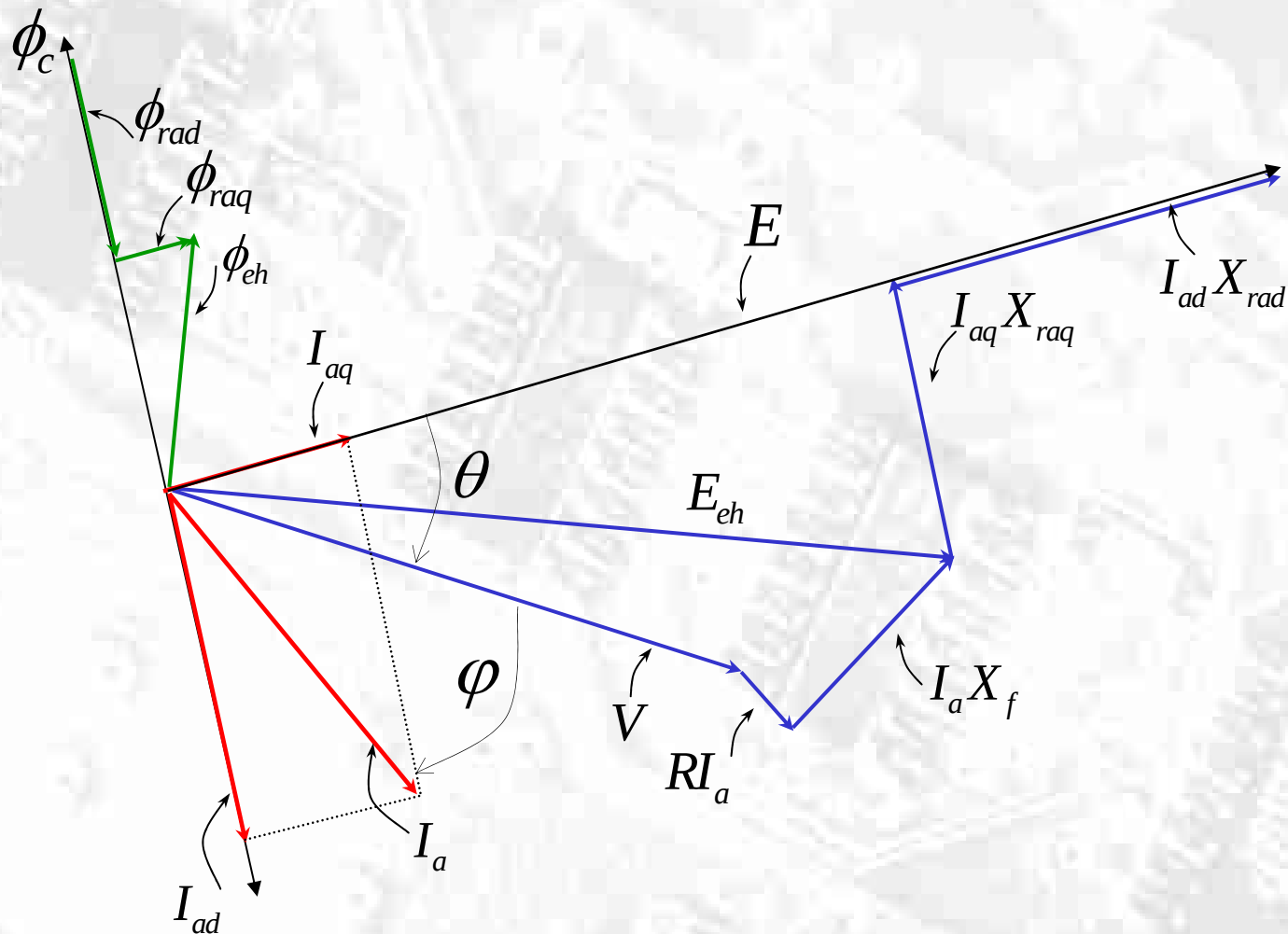


Diagrama Fasorial General Máquina Sincrónica, Consumo Inductivo

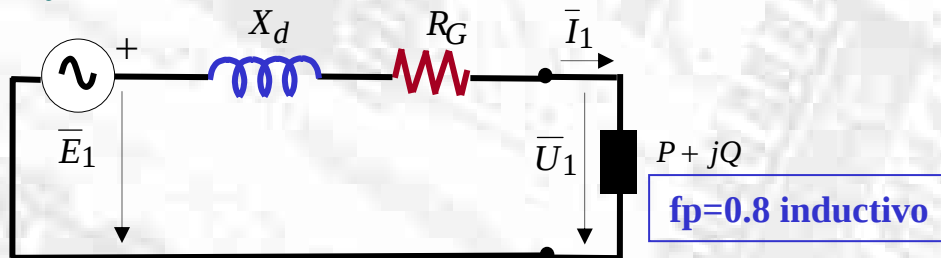


Generador Sincrónico(XI)

Tipos de Operación del Generador Síncrono

$$\text{Re } g = 100 \times \frac{|\bar{E}_1| - |\bar{U}_1|}{|\bar{U}_1|}$$

Ejemplo:



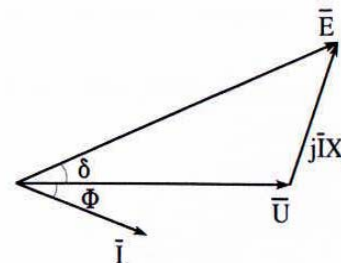
3- ϕ 1000 MVA,
35 kV
 $R_G = 0.001 \text{ ohm}$
 $X_d = 0.15 \text{ ohm}$

Calcular Regulación para carga en condición nominal.

$$\begin{aligned} U_1 &= 35/\sqrt{3} = 20.20 \text{ kV} \\ I_1 &= 1000/(3 \times 20.20) = 16.50 \text{ kA} \\ \bar{E}_1 &= (20200 + j0) + (0.001 + j0.15)[16500(0.8 - j0.6)] \\ &= 21698 + j1970 \text{ V} \\ \text{Regulación} &= 100 \times (|21698 + j1970| - 20200)/20200 \\ &= 7.86\% \end{aligned}$$

Generador Sobreexcitado

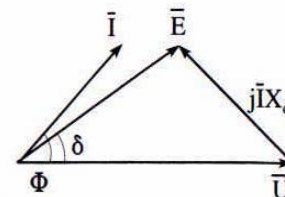
$P_G > 0 \quad Q_G > 0$



$$0 < \delta < 90^\circ \\ 0 < \Phi < 90^\circ$$

Generador Subexcitado

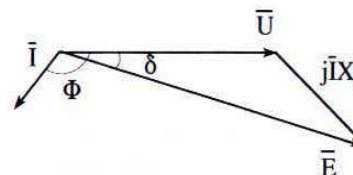
$P_G > 0 \quad Q_G < 0$



$$0 < \delta < 90^\circ \\ -90^\circ < \Phi < 0$$

Motor Sobreexcitado

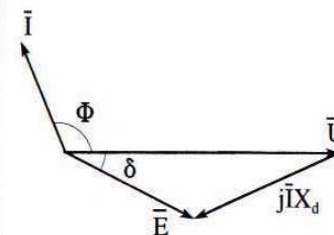
$P_G < 0 \quad Q_G > 0$



$$-90^\circ < \delta < 0 \\ 90^\circ < \Phi < 180^\circ$$

Motor Subexcitado

$P_G < 0 \quad Q_G < 0$



$$-90^\circ < \delta < 0 \\ -180^\circ < \Phi < -90^\circ$$

Fuente: UNIDO

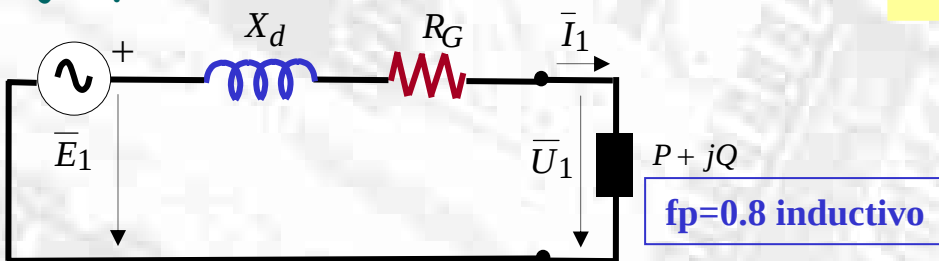


Generador Sincrónico(XI)

Tipos de Operación del Generador Síncrono

$$\text{Reg} = 100 \times \frac{|\bar{E}_1| - |\bar{U}_1|}{|\bar{U}_1|}$$

Ejemplo:



$f_p=0.8$ inductivo

3- ϕ 1000 MVA,
35 kV
 $R_G=0.001$ Ohm
 $X_d=0.15$ Ohm

Calcular Regulación para carga en condición nominal.

$$U_1 = 35/\sqrt{3} = 20.20 \text{ kV}$$

$$I_1 = 1000/(3 \times 20.20) = 16.50 \text{ kAmps}$$

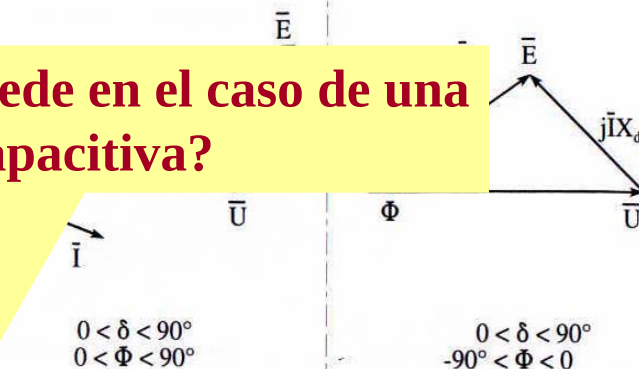
$$\begin{aligned} \bar{E}_1 &= (20200 + j0) + (0.001 + j0.15)[16500(0.8 - j0.6)] \\ &= 21698 + j1970 \text{ volts} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Regulación} &= 100 \times (|21698 + j1970| - 20200)/20200 \\ &= 7.86\% \end{aligned}$$

Qué sucede en el caso de una carga capacitiva?

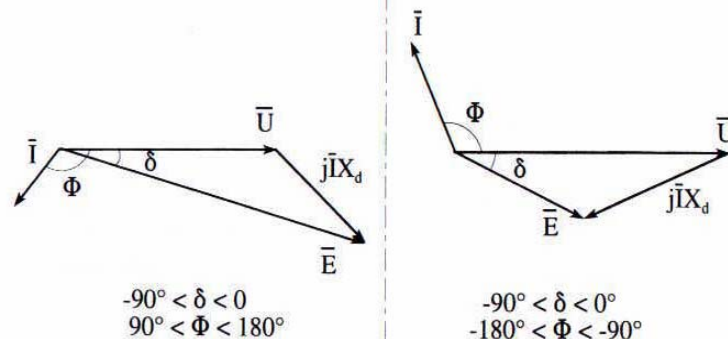
Generador
Sobreexcitado
 $P_G > 0 \quad Q_G > 0$

Generador
Subexcitado
 $P_G > 0 \quad Q_G < 0$



Motor
Sobreexcitado
 $P_G < 0 \quad Q_G > 0$

Motor
Subexcitado
 $P_G < 0 \quad Q_G < 0$



Fuente: UNIDO



Diagrama de Operación del Generador Sincrónico

Posibles puntos de operación del generador síncrono dependen de la dimensión y tipo de armado de la máquina (ventilación de devanados de rotor y estator, saturación del núcleo, tipo de colector, etc.)

- máxima potencia activa
- máxima corriente de armadura
- máxima corriente de excitación
- mínima corriente de excitación
- estabilidad permanente

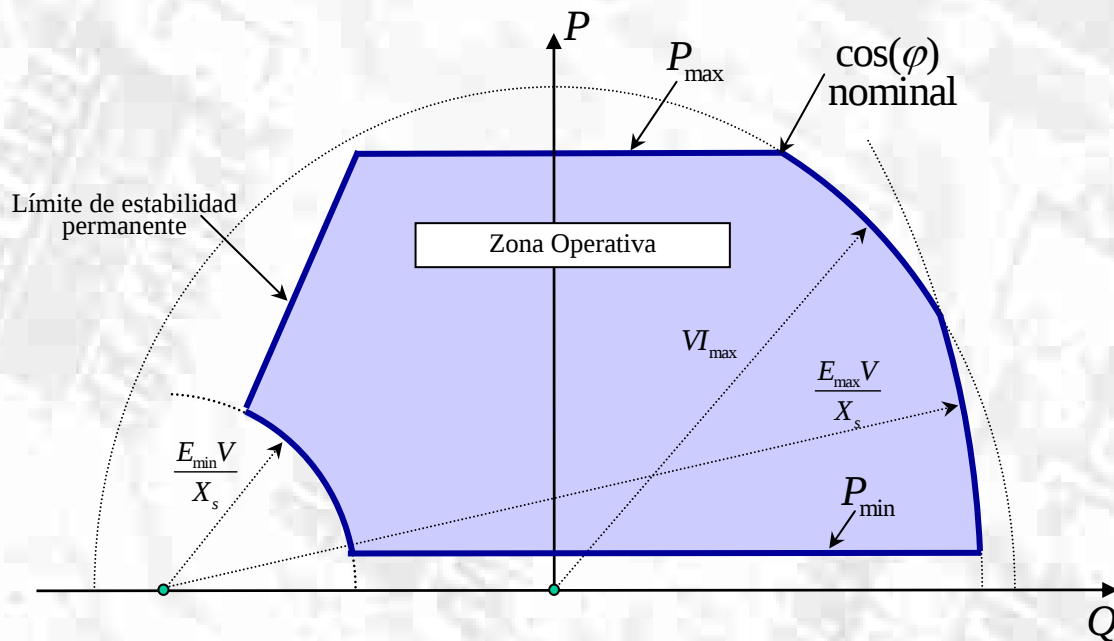


Diagrama de Operación del Generador Sincrónico
Rotor cilíndrico

$$P_G = \frac{EU_N}{X_\delta} \sin \delta = \omega_m M_G$$

$$Q_G = \frac{EU_N}{X_\delta} \cos \delta - \frac{U_N^2}{X_\delta}$$

Fuente: UNIDO



Este diagrama muestra la Zona Operativa en un plano de potencia (P) versus flujo de potencia (Q). La zona operativa está representada por un área sombreada en azul, limitada por una curva de límite de estabilidad permanente (línea punteada). Las curvas de flujo de potencia máxima ($P_{\max}$) y mínima ($P_{\min}$) están indicadas. La zona operativa está dividida en dos regiones: la región superior ($VI_{\max}$) y la región inferior ($f(E_{\min})$).

Diagrama de Operación del Generador Sincrónico

Fuente: UNIDO



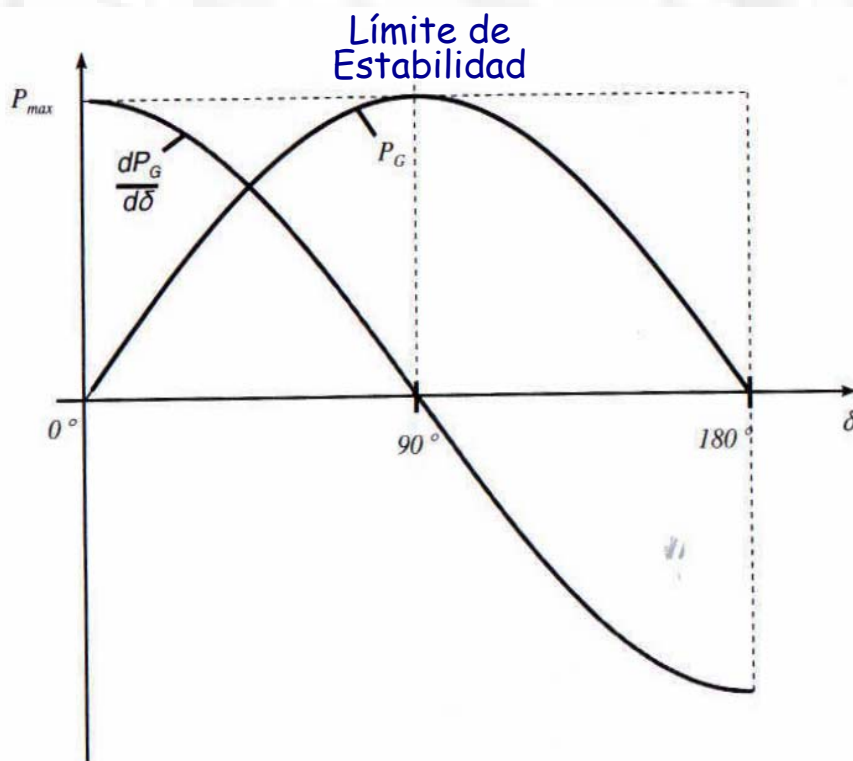
Estabilidad Permanente

Un generador se encuentra en una zona de estabilidad permanente, cuando frente a pequeñas perturbaciones es capaz de volver al antiguo punto de operación.

$$P_G = \frac{EU_N}{X_\delta} \sin \delta = \omega_m M_G$$

$$\frac{dP_G}{d\delta} = \frac{EU_N}{X_\delta} \cos \delta$$

Máxima entrega de potencia activa -->
 $\delta = 90^\circ$



Potencia activa del generador
en función del ángulo de carga.

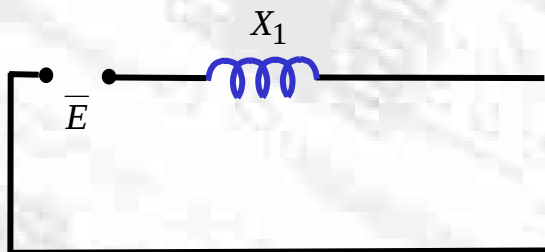
Fuente: UNIDO



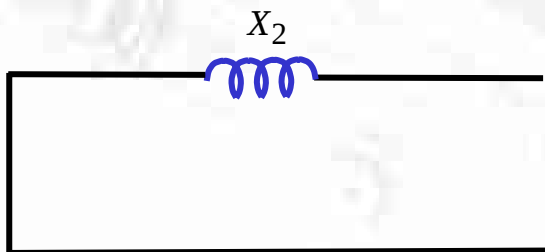
Generador Sincrónico(XV)

Modelo en mallas de secuencia (cálculo de fallas)

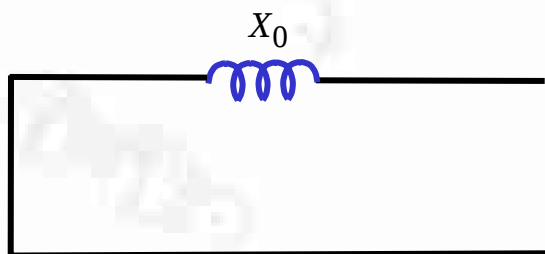
Equivalente monofásico del generador sincrónico, necesario para estudios de fallas con mallas de secuencia.



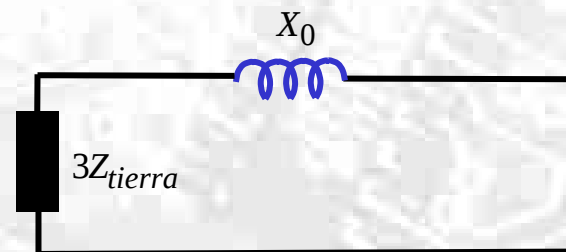
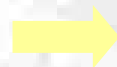
(+) secuencia positiva



(-) secuencia negativa



(0) secuencia cero
sólo si neutro está
conectado a tierra





Generador Sincrónico(XVI)

Modelo dinámico

Los parámetros del generador sincrónico no son constantes respecto del tiempo

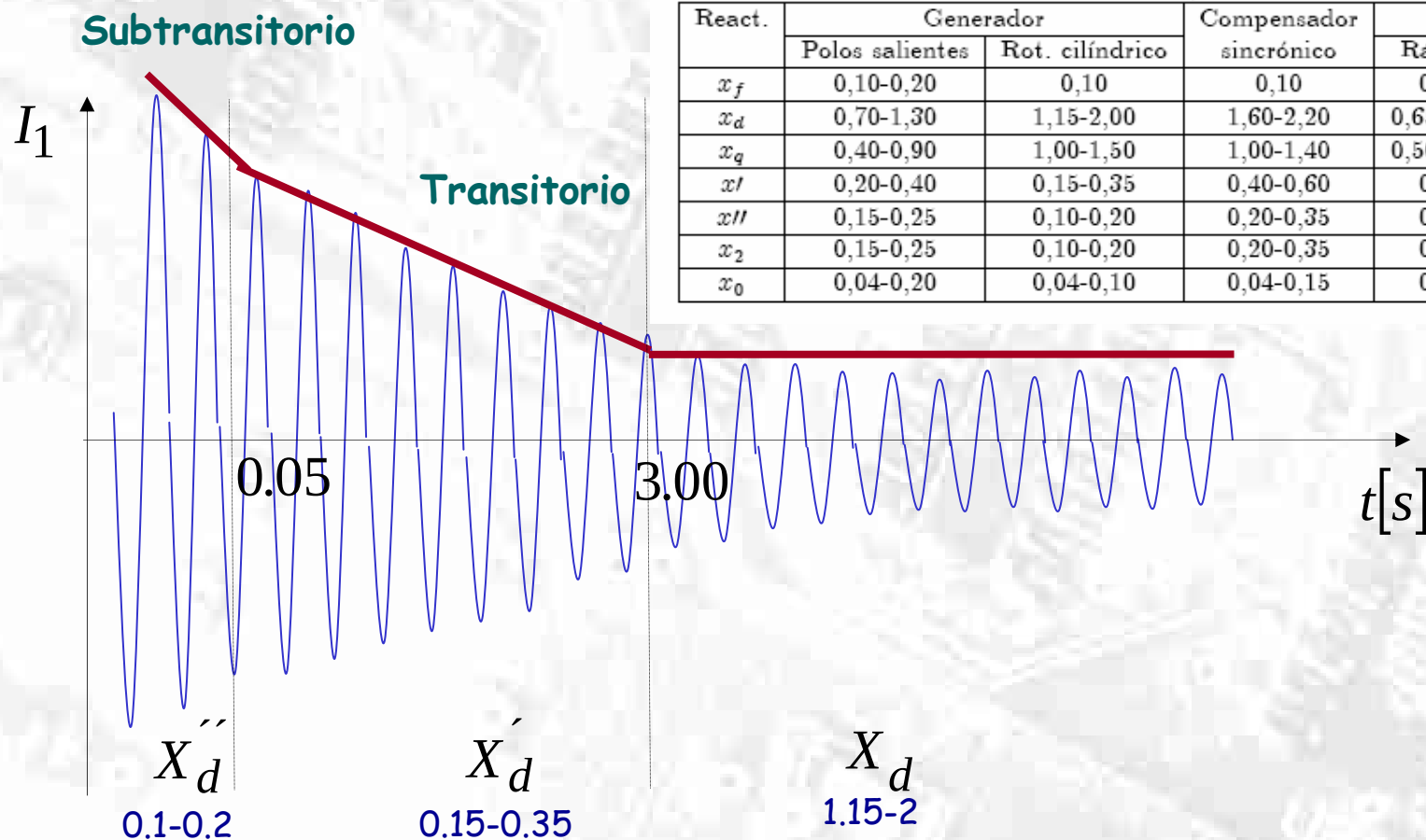


TABLE 4.1. Reactancias típicas (valores en p.u. base propia)

React.	Generador		Compensador sincrónico	Motor	
	Polos salientes	Rot. cilíndrico		Rápido	Lento
x_f	0,10-0,20	0,10	0,10	0,10	0,10
x_d	0,70-1,30	1,15-2,00	1,60-2,20	0,65-0,90	0,80-1,50
x_q	0,40-0,90	1,00-1,50	1,00-1,40	0,50-0,70	0,60-1,10
x_l	0,20-0,40	0,15-0,35	0,40-0,60	0,30	0,35
x_{ll}	0,15-0,25	0,10-0,20	0,20-0,35	0,18	0,2
x_2	0,15-0,25	0,10-0,20	0,20-0,35	0,19	0,35
x_0	0,04-0,20	0,04-0,10	0,04-0,15	0,05	0,07



Partida de Máquinas Sincrónica

Momento de giro electromagnético --> (sólo si) --> campo rotatorio del rotor gira a la misma velocidad que el campo rotatorio del estator. No se cumple para el caso de máquina parada y conectada a la red --> necesidad de tracción auxiliar

Caso 1: Partida asincrónica

Fabricación de bobina cortocircuitada en zapatos de polos --> comportamiento similar a máquina asincrónica. Se gira hasta rpm un poco por debajo de velocidad de giro nominal (velocidad de sincronismo) --> Sincronización a través de activación de corriente de excitación.

Caso 2: Partida con motor auxiliar

Caso estándar.

Uso de motor auxiliar para alcanzar velocidad de sincronismo. En el momento de la conexión deben coincidir: voltajes generador y sistema --> frecuencia, módulo, secuencia de fases y desfase.