



Escuela de  
Ingeniería  
Universidad  
de Chile



# **EL 57A SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA**

## **Clase 5: Componentes de Sistemas de Potencia**

**Luis Vargas  
AREA DE ENERGIA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA ELECTRICA**



## Contenido (III)

### 3. Las componentes de los sistemas eléctricos de potencia

3.1 Introducción

3.2 Generador Síncrono

3.3 Líneas de Transmisión

3.4 Transformadores

3.5 Redes de Transmisión y Subestaciones



Escuela de  
Ingeniería  
Universidad  
de Chile



# Introducción (I)

Equipo	Símbolo Europeo	Americano
Reactor, Bobina		
Transformador 3 $\phi$ de dos enrollados separados		
Transformador 3 $\phi$ de tres enrollados separados		
Transformador 1 $\phi$ de dos enrollados		
Transformador 3 $\phi$ , 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		




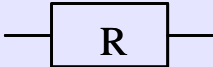
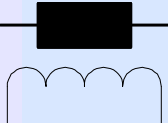
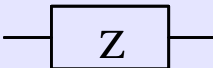
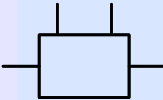
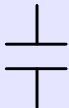
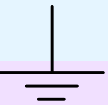

## Introducción (III)

Equipo	Símbolo
Generador	
Consumo	
Conexión Delta	
Conexión Delta abierta	
Conexión Estrella	
Conexión Zig-Zag	
C-C	
Aternativa para C-C	

Equipo	Símbolo
Posibilidad de variar bajo carga	
Posibilidad de posicionar	
Conexión T	
Conexión Estrella con Neutro	
Conexión Estrella-Delta	
Conductor genérico	
C-A	
Conexiones	

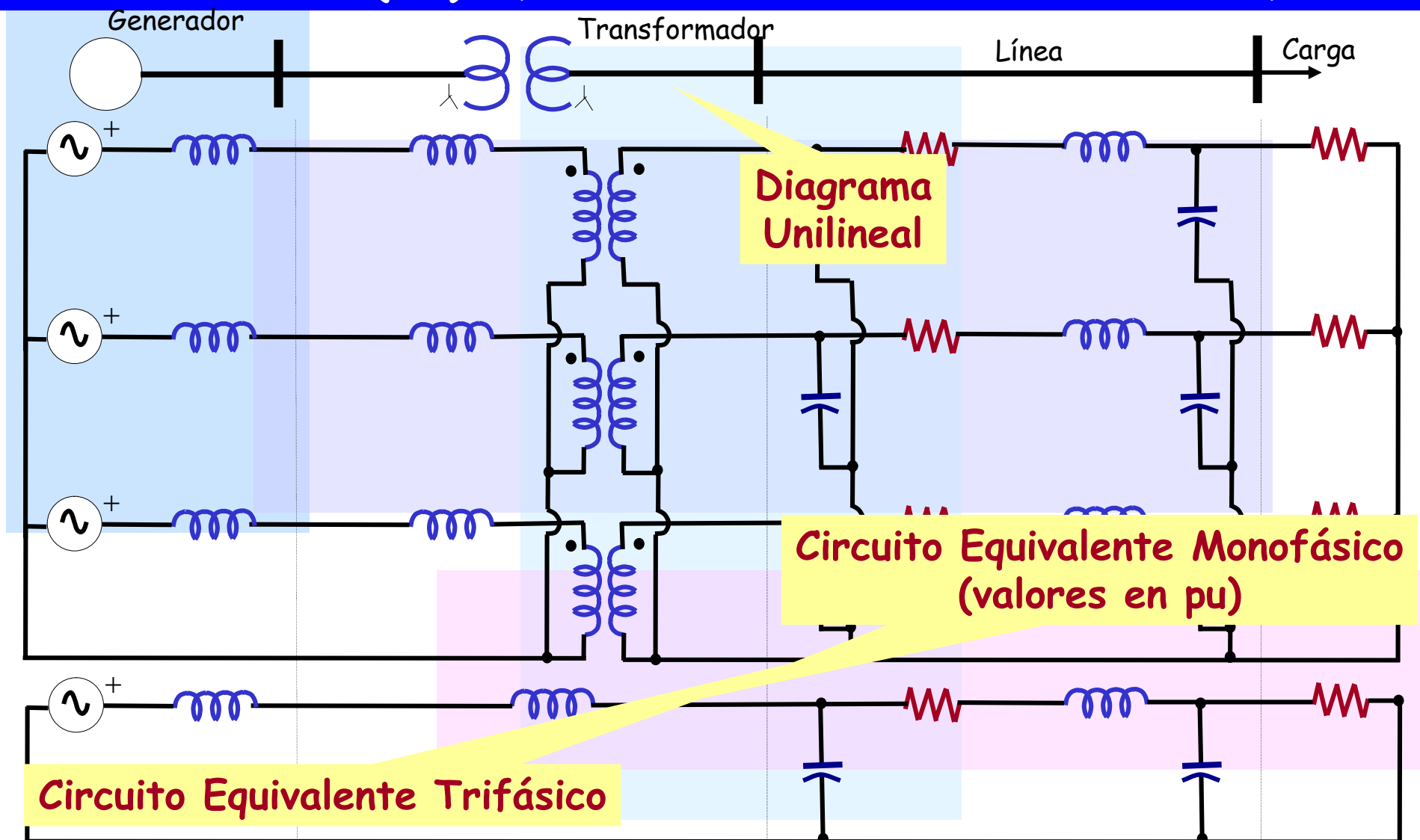


## Introducción (V)

Equipo	Símbolo	Equipo	Símbolo
Línea con 3 conductores		Resistencia	
Inductancia, bobina		Impedancia $R+jX$	
Impedancia fija		Condensador, Capacidad	
Tierra		Batería, Acumulador	



## Introducción (VI) Representación de un sistema eléctrico de potencia

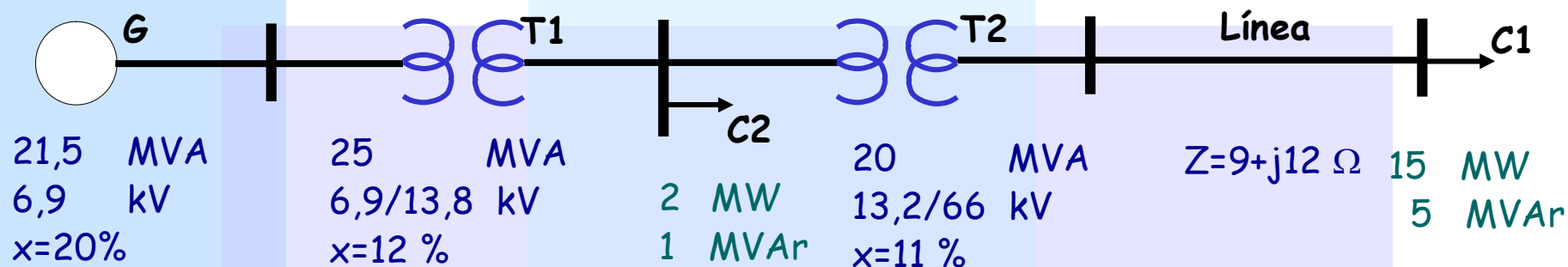






## Introducción (VII)

### Ejemplo de Aplicación



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





## Introducción (IX)

### Necesidad de Modelar Componentes

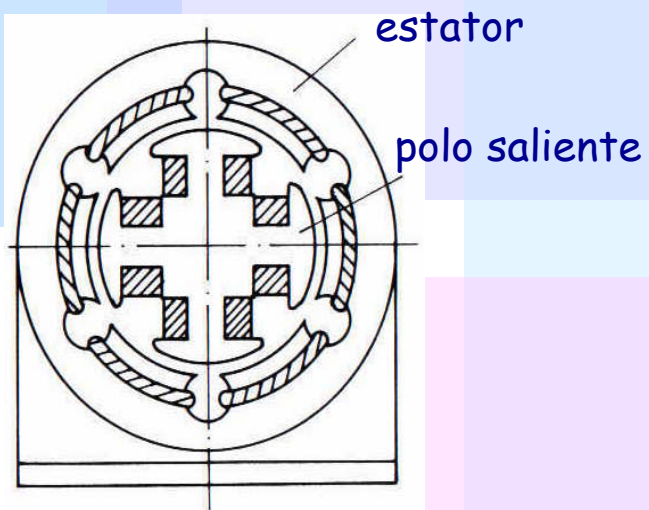
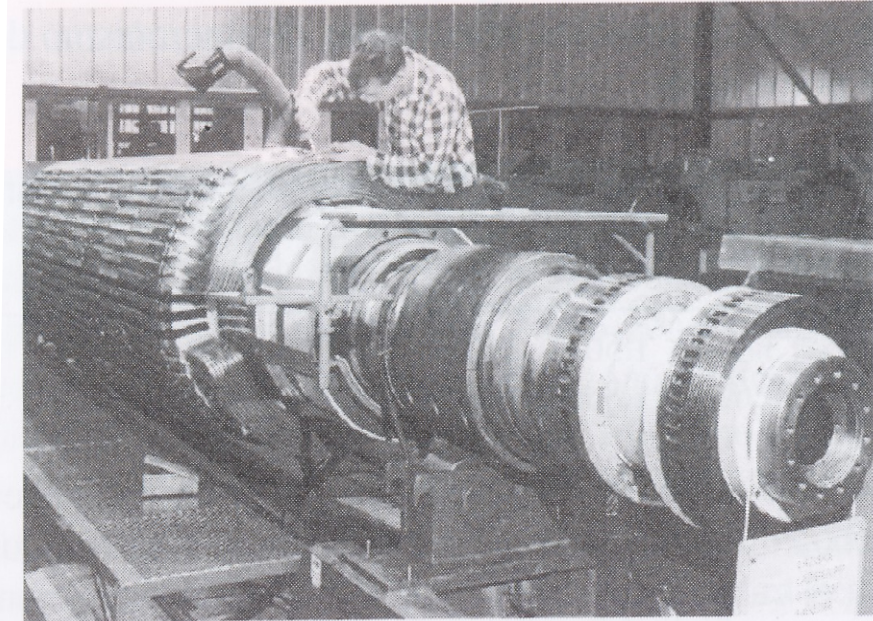
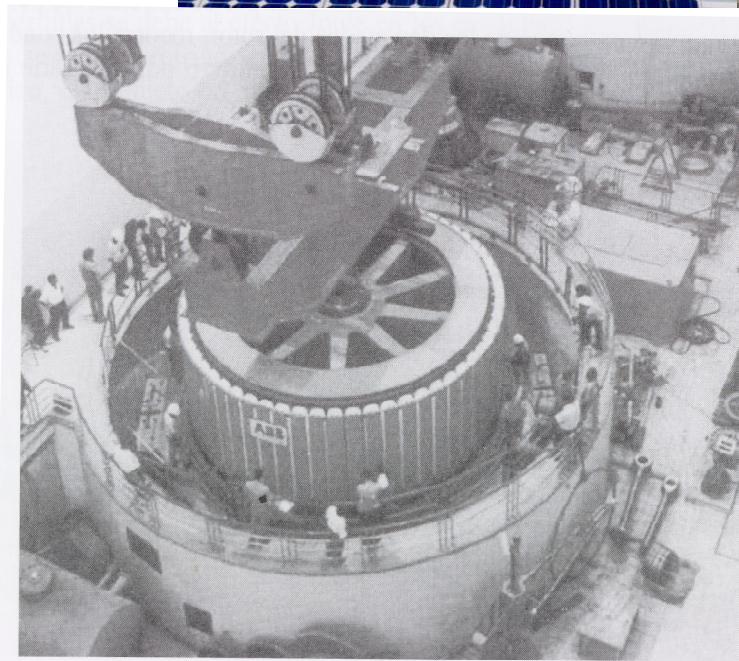
- Estructura General
- Modelo de Operación en Régimen Normal
- Modelo de Operación ante Perturbaciones

### Criterios de Modelación

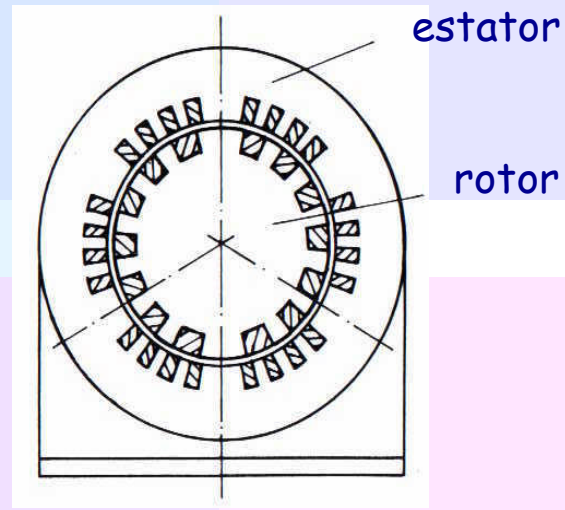
- Explicar comportamiento de equipos desde el punto de vista del Sistema (visto desde los bornes correspondientes)
- Precisión de modelos ajustada a condiciones de operación especificadas:

**Cuasiestacionario, estático:** Modelos lineales, monofásicos, parámetros concentrados

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



**Máquina de Polos Salientes**



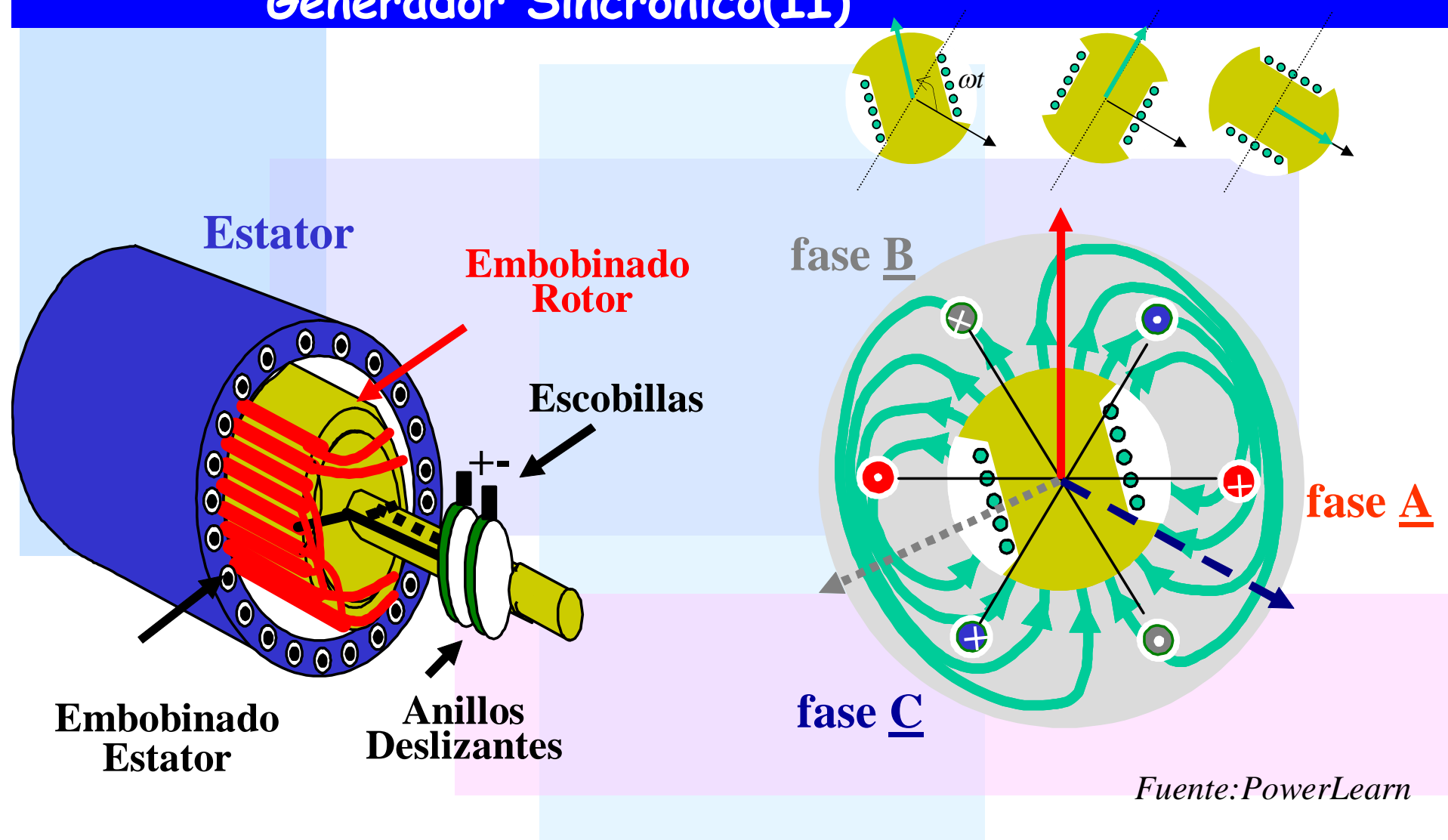
**Máquina de Rotor Cilíndrico**

*Fuente: UNIDO*





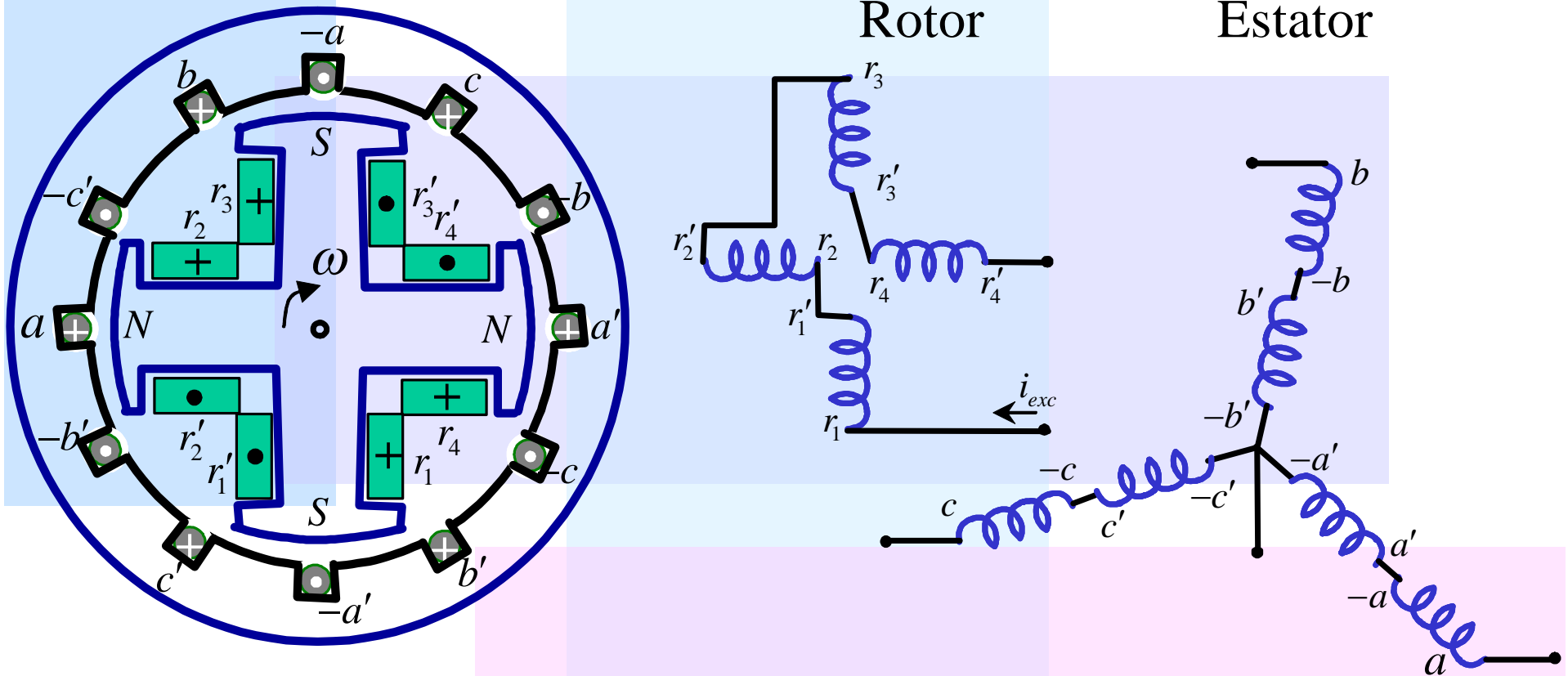
## Generador Sincrónico(II)



**Aspectos constructivos**



## Generador Sincrónico(III)



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  $\omega_m$   
--> inducirán tensiones senoidales de frecuencia angular  $\omega$  ( $2\pi f$ ) 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:

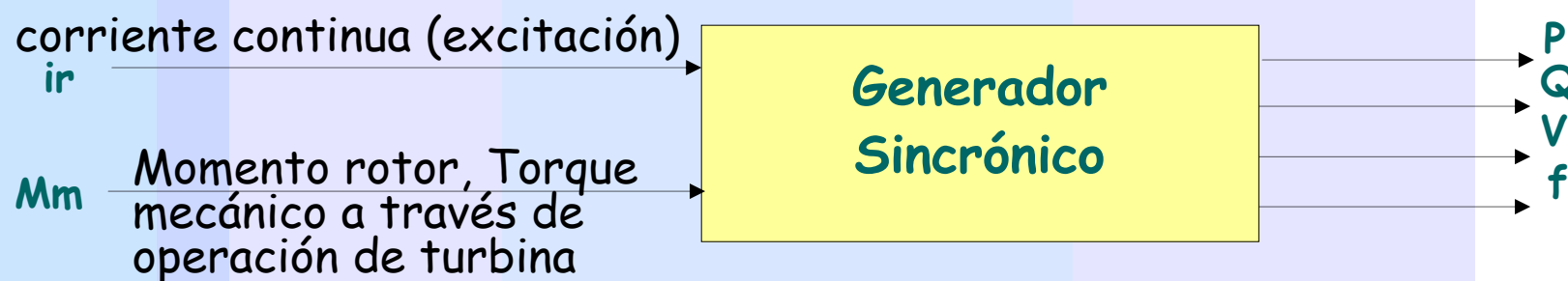
$$\omega = p \omega_m \quad \longrightarrow \quad n = \frac{\omega}{2\pi p} 60 = \frac{f}{p} 60 [\text{rpm}]$$

- 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.



## Generador Sincrónico(V)

### Comportamiento Dinámico del Generador



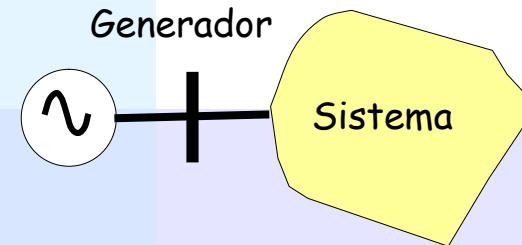
- Necesidad de simplificaciones para tratar relaciones existentes entre las variables de control y de salida. Dos casos extremos:

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



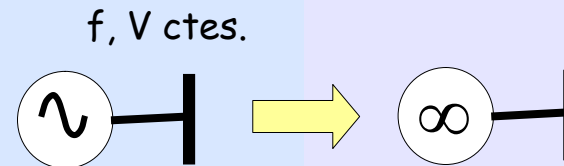
## Generador Sincrónico(VI)

### 1.- Generador conectado a barra infinita

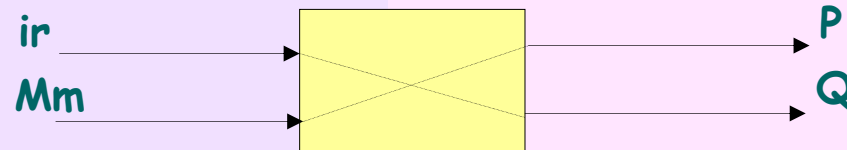
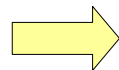


- **Barra Infinita:** es un sistema eléctrico tan grande que para todos los efectos eléctricos es equivalente a un generador síncrono de inercia infinita.

→  $f = cte.$   
 $V = cte.$



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



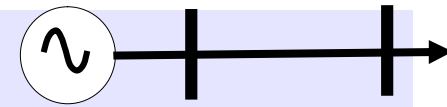




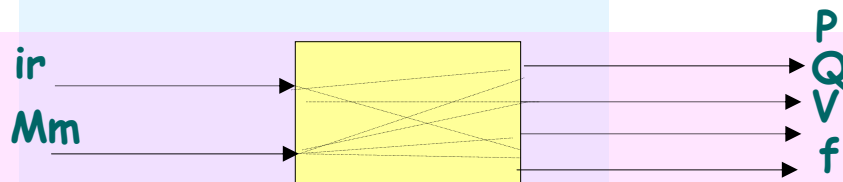
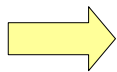
## Generador Sincrónico(VII)

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

Generador



- 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

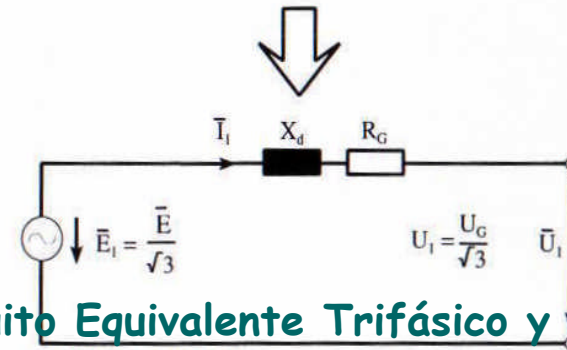
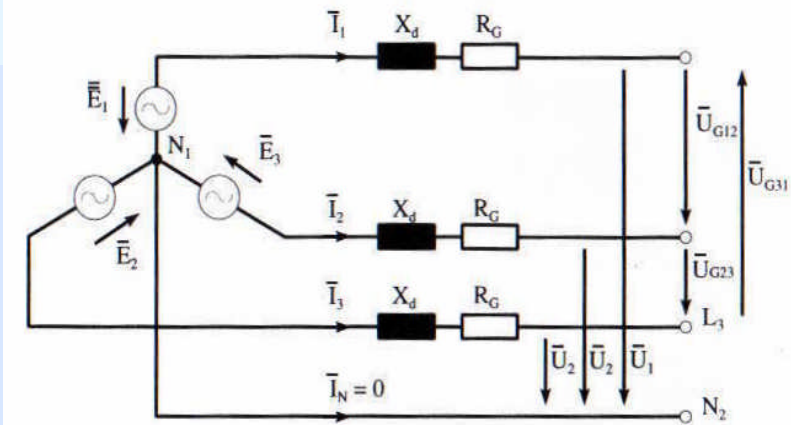




# Generador Sincrónico(IX)

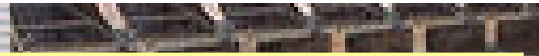
## Modelo Equivalente en Estado Estacionario

- Para deducción de circuito equivalente es conveniente estudiar las relaciones de campo en separación de aire.
- Tres campos principales desfasados temporalmente en  $120^\circ$  --> campo rotatorio en entrehierro a frecuencia  $f$  --> corresponde con velocidad de giro de la turbina.
- Desfase  $\delta$  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  $L_\sigma$ . Como consecuencia de lo anterior se puede definir:



**Circuito Equivalente Trifásico y Monofásico**

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



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

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

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

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

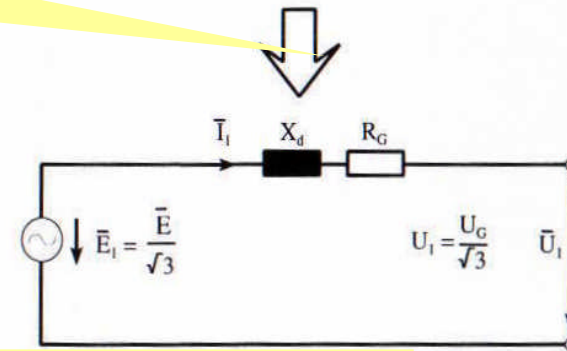
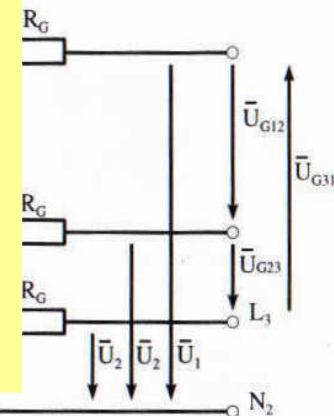
- Desfase  $\delta$  entre campo rotatorio y rotor (no existe velocidad relativa) ángulo de potencia, de carga, de torque

- Simetría en construcción --> bobina supone una inductancia principal igual  $L_h$  y distribuida  $L_{\sigma}$ . 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  **$X_{\sigma}=(0,07...0,2)$**   $X_h$  ásico y  
 Monotásico

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):

$$\begin{aligned} e \sin \delta &= x_\delta i_G \cos \varphi \\ e \cos \delta - u_N &= x_\delta i_G \sin \varphi \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} p_G &= u_N i_G \cos \varphi \\ q_G &= u_N i_G \sin \varphi \end{aligned}$$

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

$$\Rightarrow p_G = \frac{e u_N}{x_\delta} \sin \delta$$

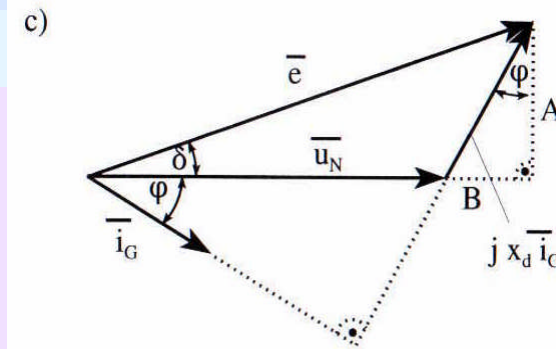
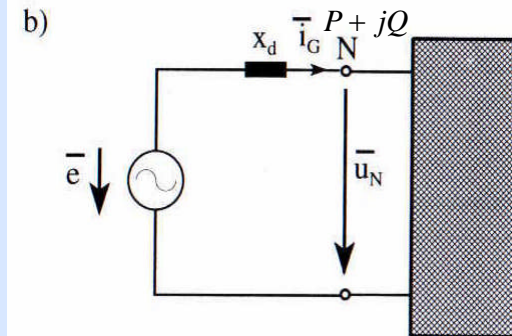
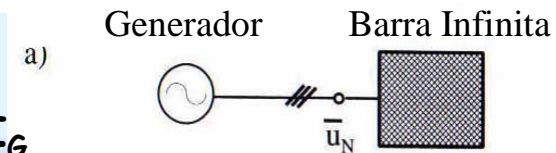
$$i_G \sin \varphi = \frac{e \cos \delta - u_N}{x_\delta}$$

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

- En magnitudes físicas

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

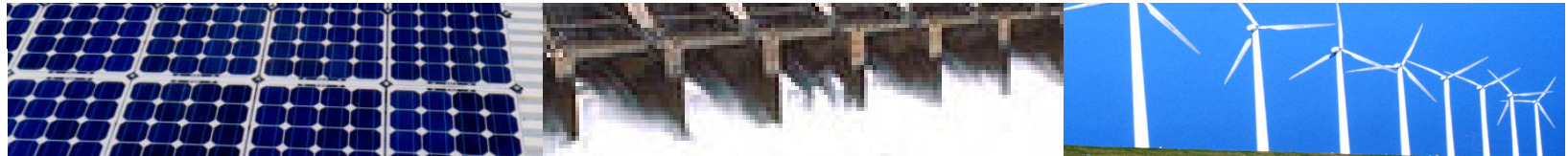
$$Q_G = \frac{E U_N}{X_\delta} \cos \delta - \frac{U_N^2}{X_\delta}$$



Fuente: UNIDO

Máquina síncrona conectada a barra infinita





# Generador Sincrónico(X)

## Puntos de Operación en Estado Estacionario

- Diagrama fasorial en caso de conexión

**operación en vacío -->  $\delta=0$**

**$\delta>0$  aumenta carga en el sistema**

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

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

$$e \sin \delta = x_{\delta} i_G \cos \varphi$$

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

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

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

**Si  $U_N$  y  $E$  son ctes. -->  $P_G$  varía con  $\delta$**

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

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

**Condición para absorber o generar reactivos**

**$Q<0$  --> máquina subexcitada**

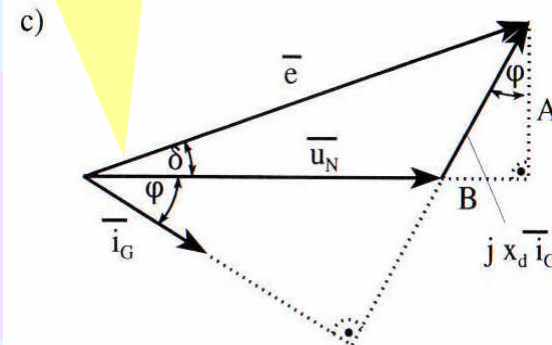
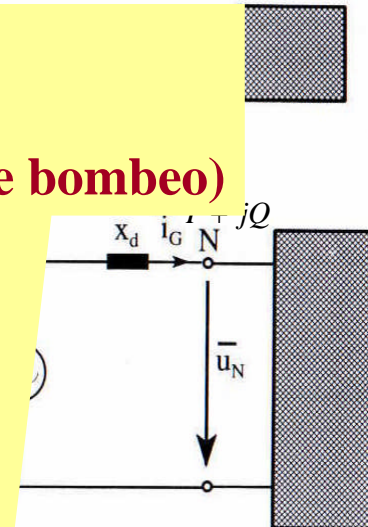
**$Q>0$  --> máquina sobreexcitada**

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

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

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

Generador Barra Infinita



Fuente: UNIDO

**Máquina síncrona conectada a barra**



Escuela de  
Ingeniería  
Universidad  
de Chile



## Generador Sincrónico (X)

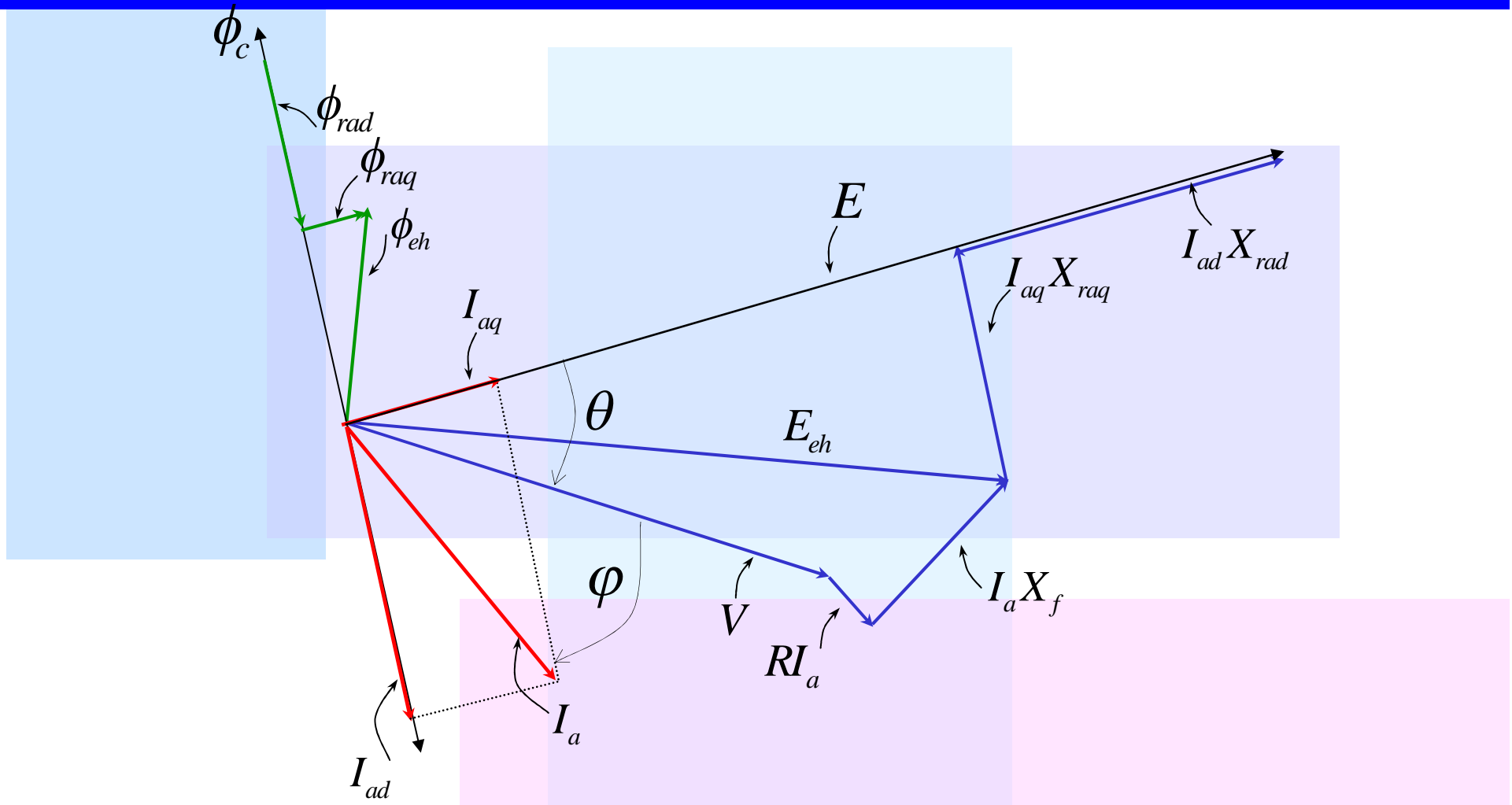


Diagrama Fasorial General Máquina Sincrónica, Consumo Inductivo



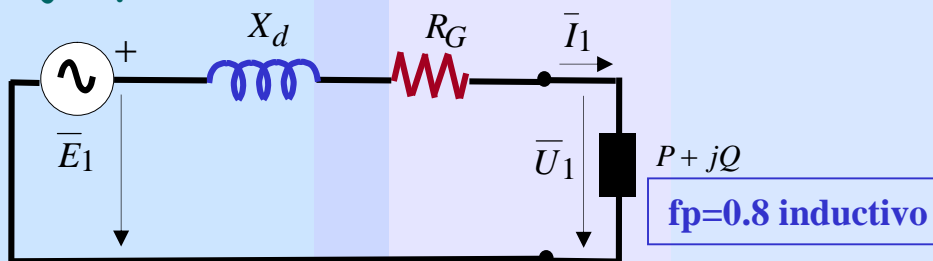
Escuela de  
Ingeniería  
Universidad  
de Chile

# Generador Sincrónico(XI)

## Tipos de Operación del Generador Sincrónico

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

Ejemplo:

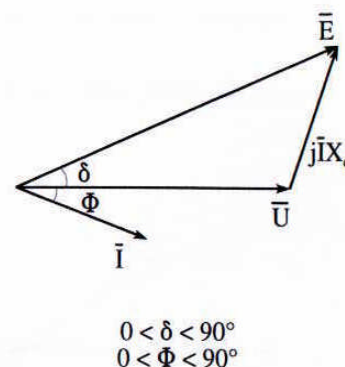


3- $\phi$  1000 MVA,  
35 kV  
 $R_G = 0.001$  ohm  
 $X_d = 0.15$  ohm

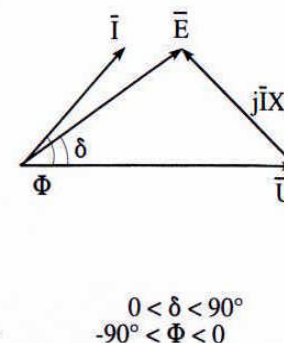
Calcular Regulación para carga en condición nominal.

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

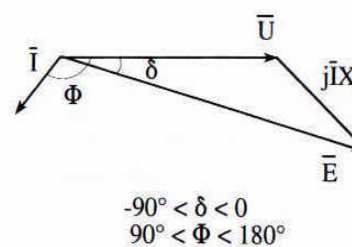
Generador  
Sobreexcitado  
 $P_G > 0$   $Q_G > 0$



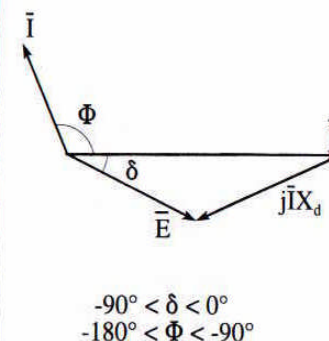
Generador  
Subexcitado  
 $P_G > 0$   $Q_G < 0$



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



Motor  
Subexcitado  
 $P_G < 0$   $Q_G < 0$



Fuente: UNIDO

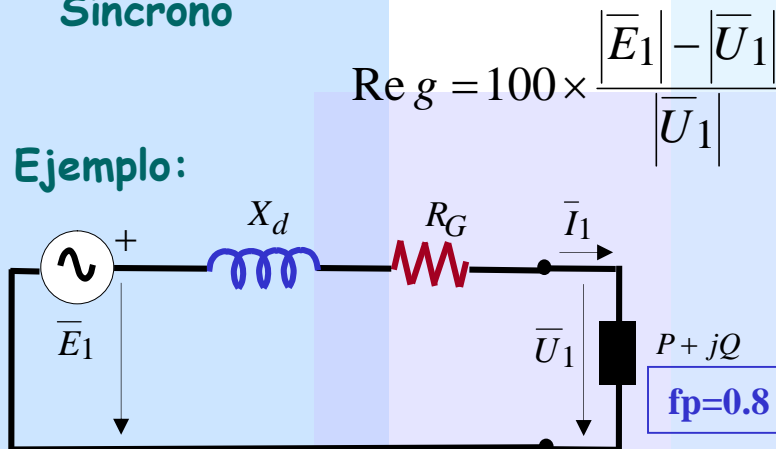




# Generador Sincrónico(XI)

## Tipos de Operación del Generador Síncrono

Ejemplo:



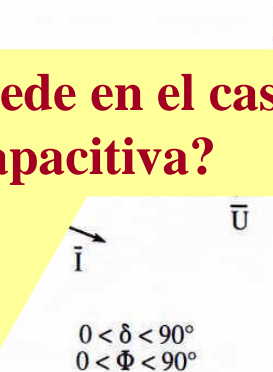
3-φ 1000 MVA,  
35 kV  
RG= 0.001 Ohm  
Xd= 0.15 Ohm

Calcular Regulación para carga en condición nominal.

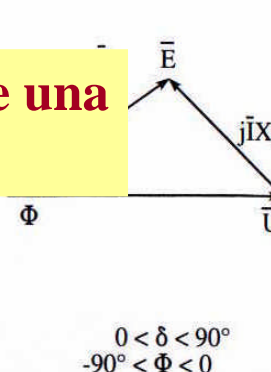
$$\begin{aligned} U_1 &= 35/\sqrt{3} = 20.20 \text{ kV} \\ I_1 &= 1000/(3 \times 20.20) = 16.50 \text{ kAmps} \\ E_1 &= (20200 + j0) + (0.001 + j0.15)[16500(0.8 - j0.6)] \\ &= 21698 + j1970 \text{ volts} \\ \text{Regulación} &= 100 \times (|21698 + j1970| - 20200)/20200 \\ &= 7.86\% \end{aligned}$$

Qué sucede en el caso de una carga capacitiva?

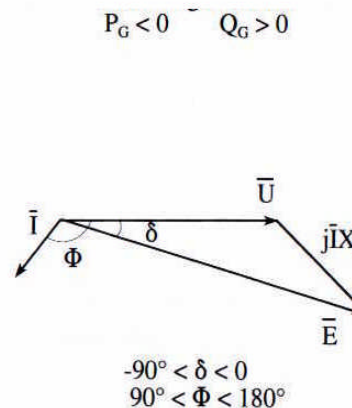
Generador  
Sobreexcitado



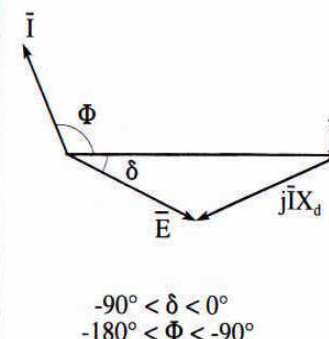
Generador  
Subexcitado



Motor  
Sobreexcitado



Motor  
Subexcitado





## Generador Sincrónico(XII)

### 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

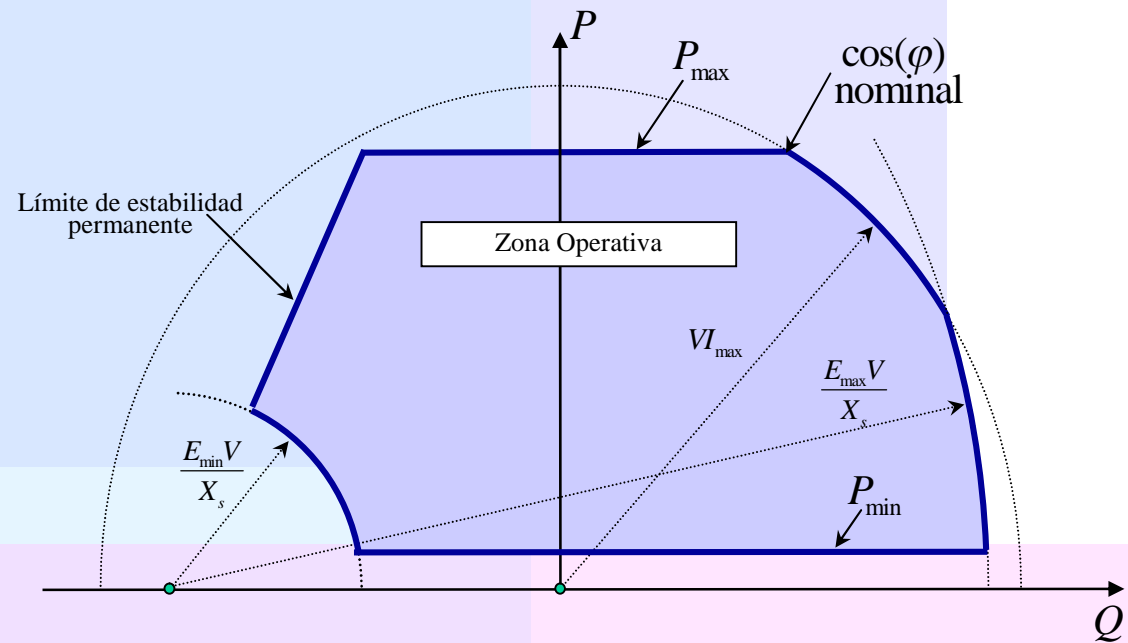
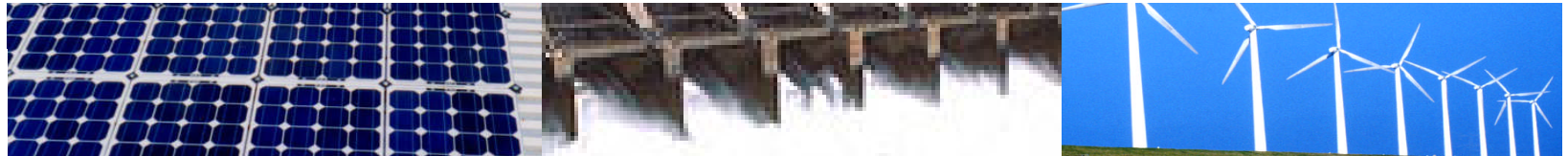


Diagrama de Operación del Generador Sincrónico  
Rotor cilíndrico

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

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



## Generador Sincrónico(XIII)

### Diagrama de Operación del Generador Sincrónico

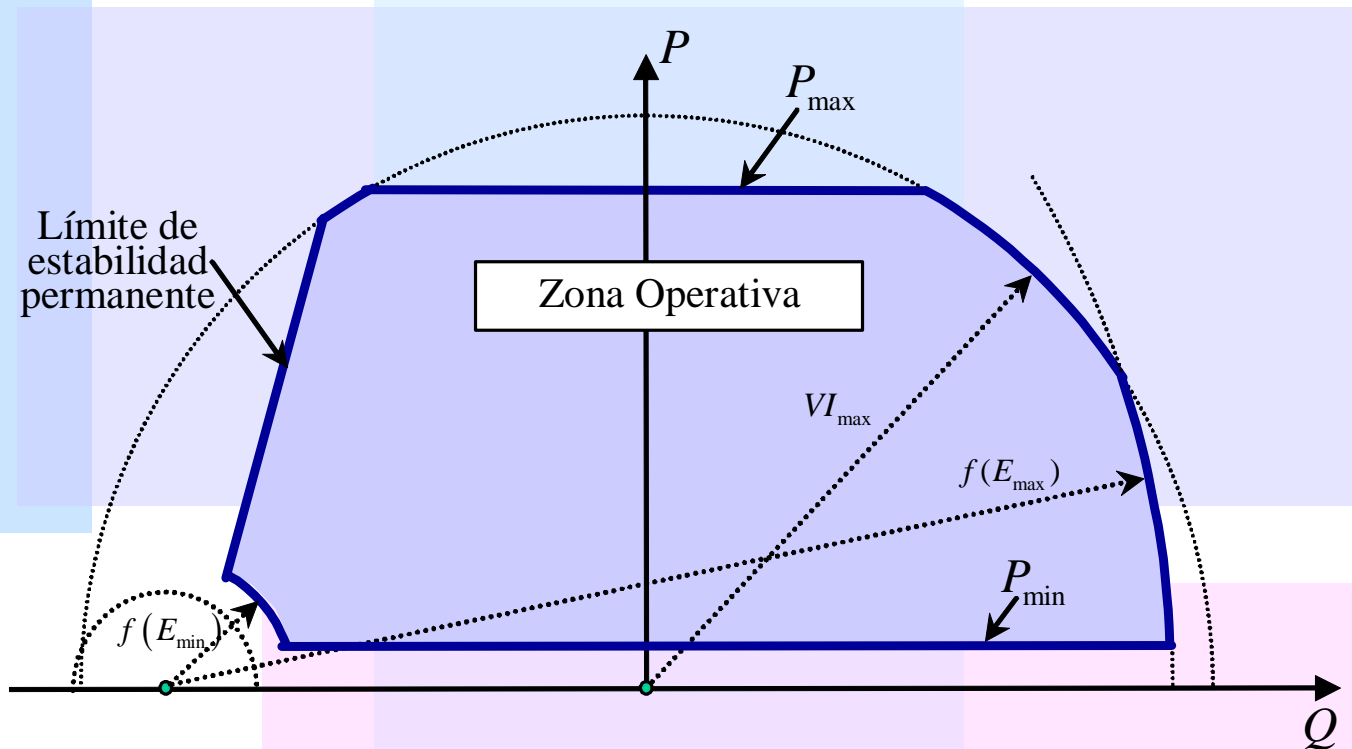


Diagrama de Operación del Generador Sincrónico  
Rotor de polos salientes

Fuente: UNIDO



## Generador Sincrónico(XIV)

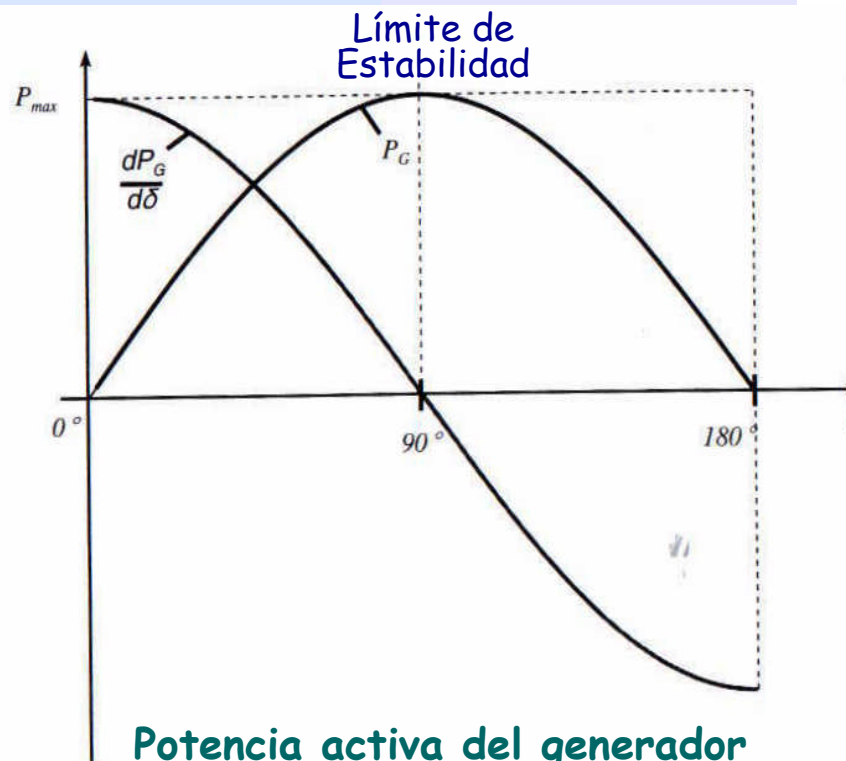
### Estabilidad Permanente

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.

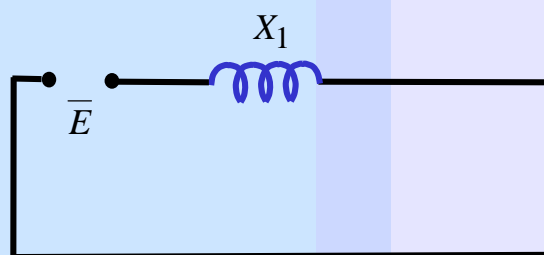
Fuente:UNIDO



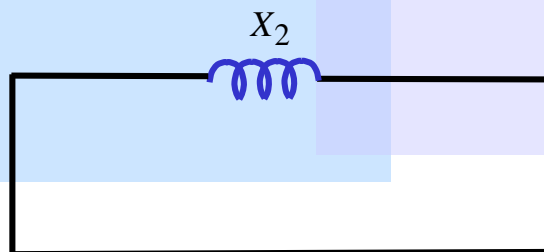
## Generador Sincrónico(XV)

### Modelo en mallas de secuencia (cálculo de fallas)

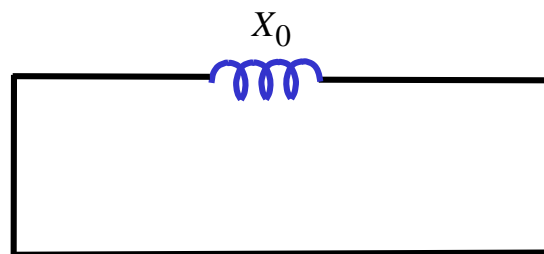
Equivalente monofásico del generador sincrónico, necesario para estudios de fallas con mallas de secuencia.



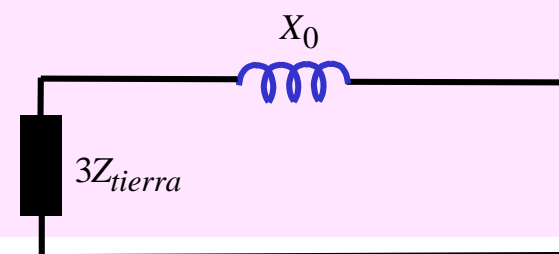
(+) secuencia positiva



(-) secuencia negativa



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







# Generador Sincrónico(XVI)

## Modelo dinámico

Los parámetros del generador síncrono no son constantes respecto del tiempo

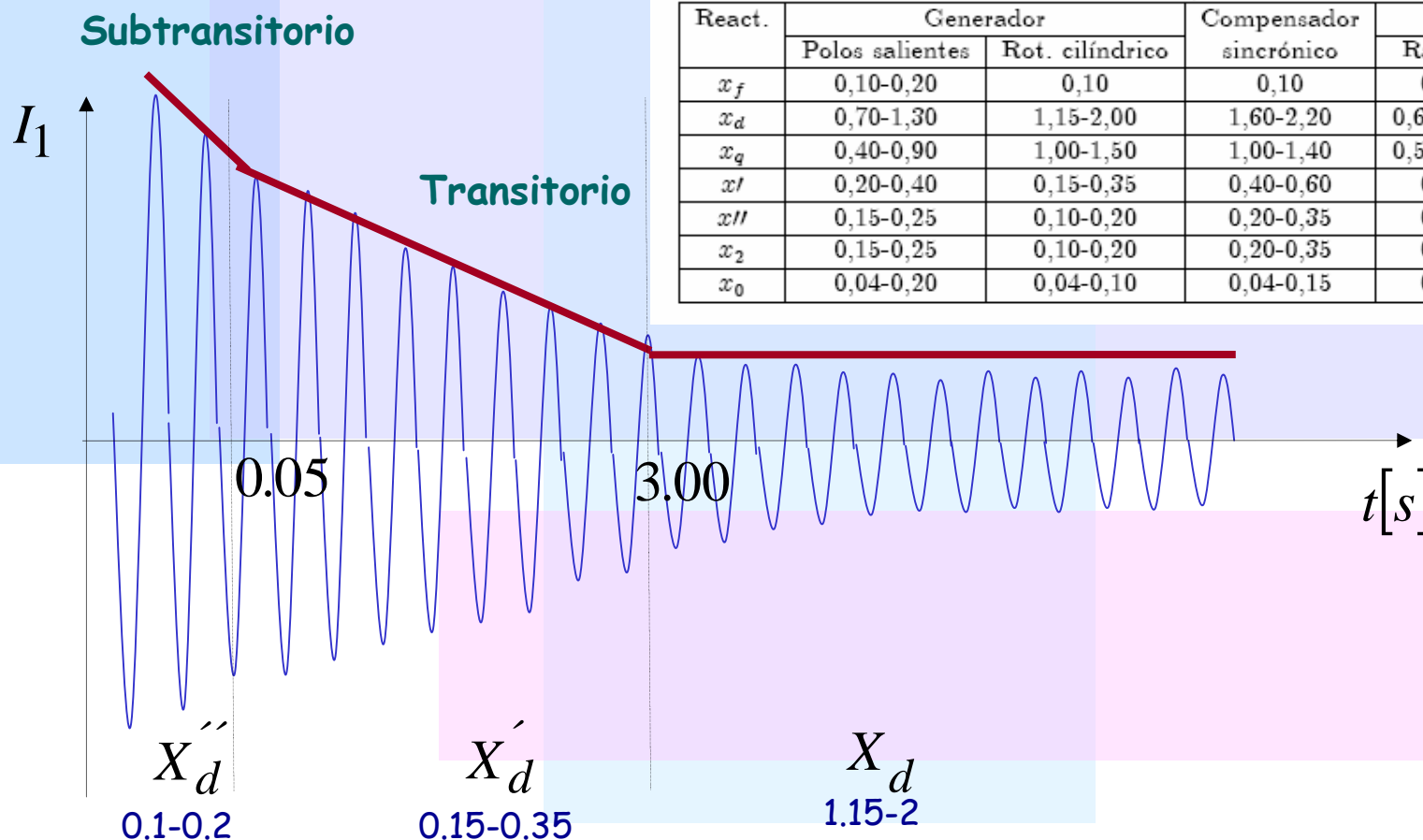


TABLE 4.1. Reactancias típicas (valores en p.u. base propia)

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



## Generador Sincrónico(XVII)

### Partida de Máquinas Sincrónica

Recordemos que el campo rotatorio del rotor gira a la misma velocidad que el campo rotatorio del estator. Eso no se cumple para el caso de máquina parada y conectada a la red  $\Rightarrow$  necesidad de tracción auxiliar

#### Caso 1: Partida asincrónica

Fabricación de bobina cortocircuitada en zapatos de polos, con ello se logra un comportamiento similar a máquina asincrónica (generador de inducción). Se gira hasta rpm un poco por debajo de velocidad de giro nominal (velocidad de sincronismo) y luego se efectúa la 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, es decir, frecuencia, módulo, secuencia de fases y desfase.