



Escuela de
Ingeniería
Universidad
de Chile



EL 57A SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA

Clase 8: Operación de Líneas de Transmisión

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



Contenido

3. Las componentes de los sistemas eléctricos de potencia

3.1 Introducción

3.2 Generador Síncrono

3.3 Líneas de Transmisión

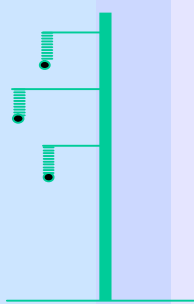
3.4 Transformadores

3.5 Redes de Transmisión y Subestaciones

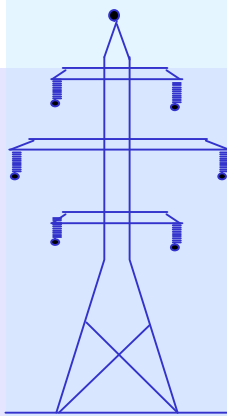


Líneas de Transmisión

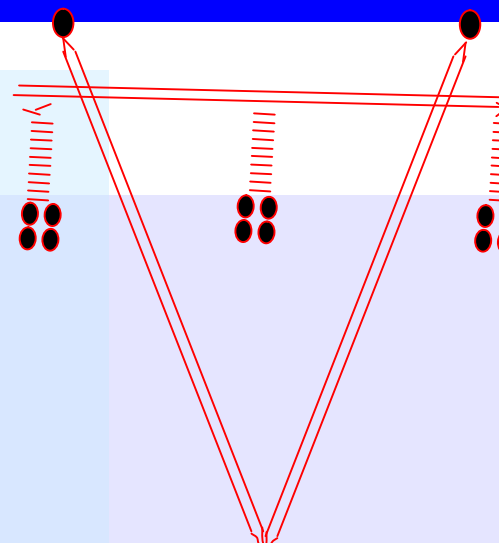
Estructuras básicas



Tensión Media



Tensión Alta

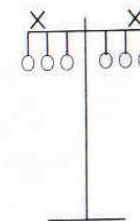
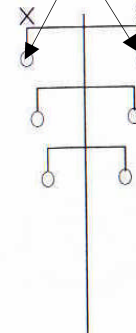
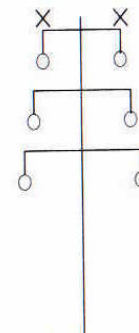
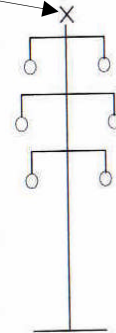
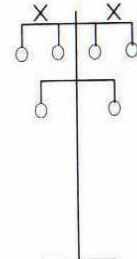
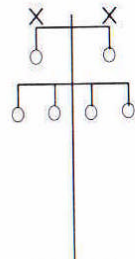
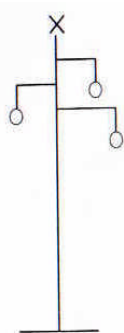


Extra Alta Tensión

Otros tipos genéricos de estructuras

Cable de tierra,
guardia

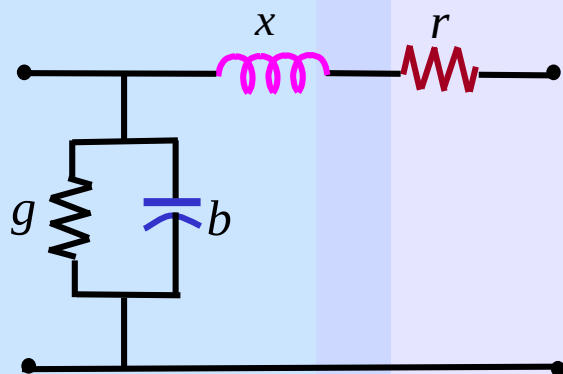
Conductor





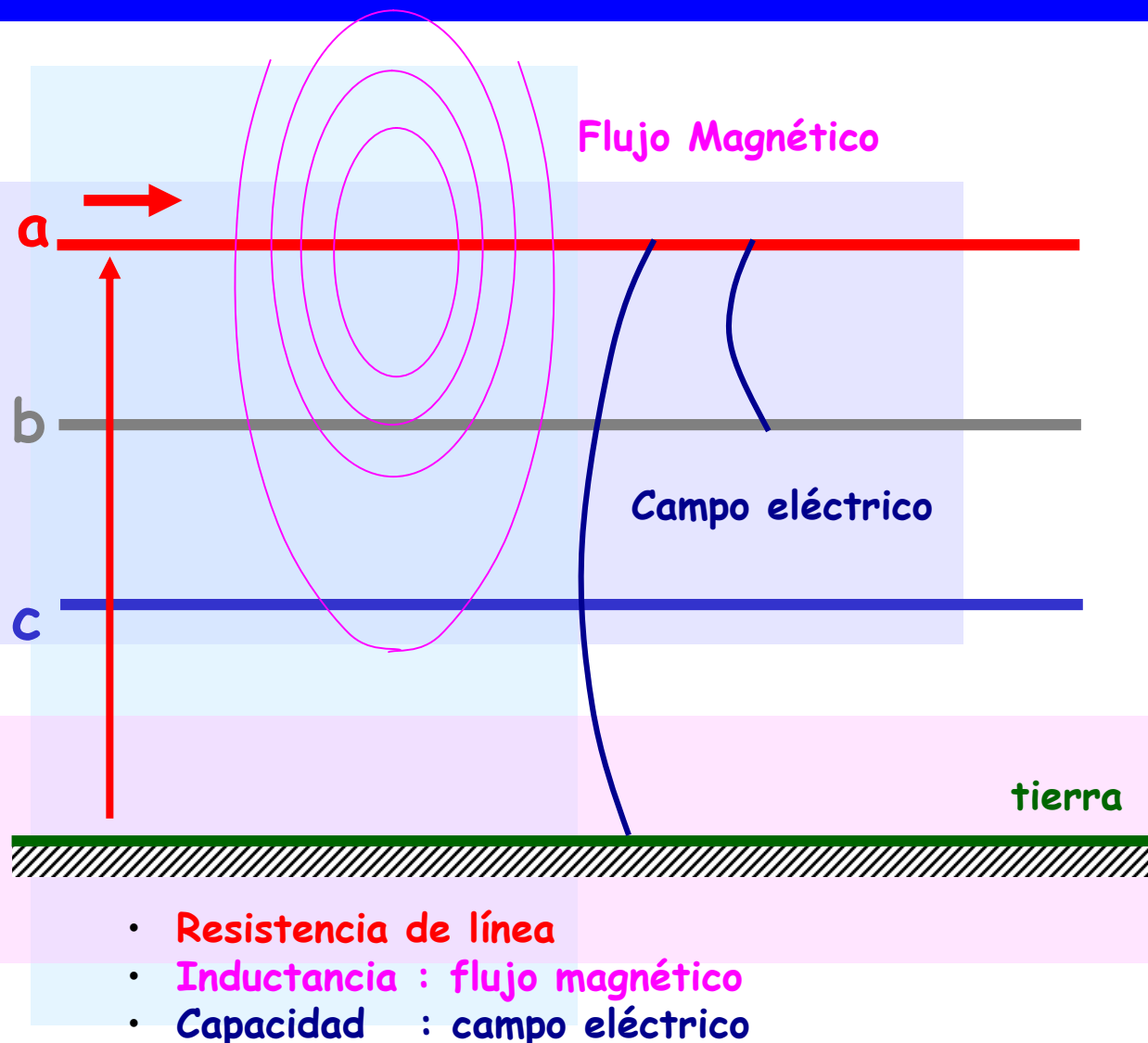
Líneas de Transmisión (V)

Modelo Equivalente



Modelo equivalente
por unidad de
longitud y fase

- r : resistencia serie
- x : reactancia serie
- g : conductancia paralelo
- b : susceptancia capacitiva





Líneas de Transmisión (V)

Comportamiento de la línea bajo diferentes condiciones de carga

$$\bar{U}(x) = \bar{U}(0) \cosh(\bar{\gamma}x) - \bar{Z}_w \bar{I}(0) \sinh(\bar{\gamma}x)$$

$$\bar{S}(x) = \bar{P}(x) + j\bar{Q}(x) = \bar{U}(x) \bar{I}^*(x)$$

$$\bar{I}(x) = \bar{I}(0) \cosh(\bar{\gamma}x) - \frac{\bar{U}(0)}{\bar{Z}_w} \sinh(\bar{\gamma}x)$$

$$\bar{\gamma} = \sqrt{(R' + j\omega L')(G' + j\omega C')} = \alpha + j\beta$$

$$\bar{Z}_w = \sqrt{\frac{(R' + j\omega L')}{(G' + j\omega C')}}$$

1. Carga natural

Carga natural o característica entrega información sobre la operación y capacidad de una línea.

Carga Simétrica y $Z_w = \frac{U(0)}{I(0)}$



$$\begin{aligned} U(x) &= U(0) [\cosh(\gamma x) - \sinh(\gamma x)] \\ I(x) &= I(0) [\cosh(\gamma x) - \sinh(\gamma x)] \end{aligned}$$



Características de operación bajo carga natural:

$$\Rightarrow \bar{S}(0) = \bar{U}(0) \bar{I}^*(0) = \bar{U}(0) \frac{\bar{U}^*(0)}{\bar{Z}_w^*} = \frac{U^2(0)}{\bar{Z}_w^*}$$

Expresada
en valores
nominales

$$\bar{S}(0) = \frac{U_N^2}{\bar{Z}_w^*} \Rightarrow P_{nat} = \frac{U_N^2}{R_w}$$

La línea sólo transmite potencia activa. Para armado de campos eléctricos y magnéticos no se requiere de potencia reactiva externa.

Características de operación:



Líneas de Transmisión (XXIX)

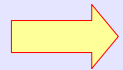
2. Operación en vacío (efecto Ferranti)

$$\bar{U}(x) = \bar{U}(0) \cosh(\bar{\gamma}x) - \bar{Z}_w \bar{I}(0) \sinh(\bar{\gamma}x)$$

$$\bar{I}(x) = \bar{I}(0) \cosh(\bar{\gamma}x) - \frac{\bar{U}(0)}{\bar{Z}_w} \sinh(\bar{\gamma}x)$$

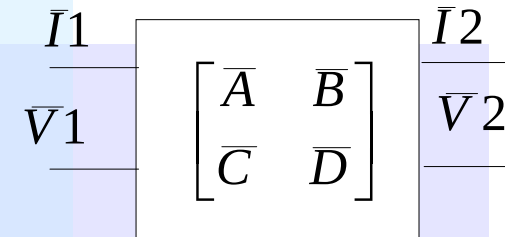
$$\bar{V}_1 = \bar{A}\bar{V}_2 + \bar{B}\bar{I}_2$$

$$\frac{\bar{V}_2}{\bar{V}_1} = \frac{1}{\bar{A}}$$



$$\left| \frac{\bar{V}_2}{\bar{V}_1} \right| > 1$$

Parámetros ABCD de
una línea



This phenomenon was first reported by Sebastian Z. Ferranti, in 1886 during the development of a 10 kV electric power supply project for the Grossvenor Gallery. The voltage required at the output of the power plant, located at Deptford, was only of 8500 V when the voltage at receiving end was 10000 V. (*)

Javier Sanz

(*) J. Fraile "Diccionario biográfico de la Ingeniería Eléctrica". U. Politécnica de Madrid.

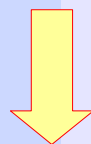


Líneas de Transmisión (XXX)

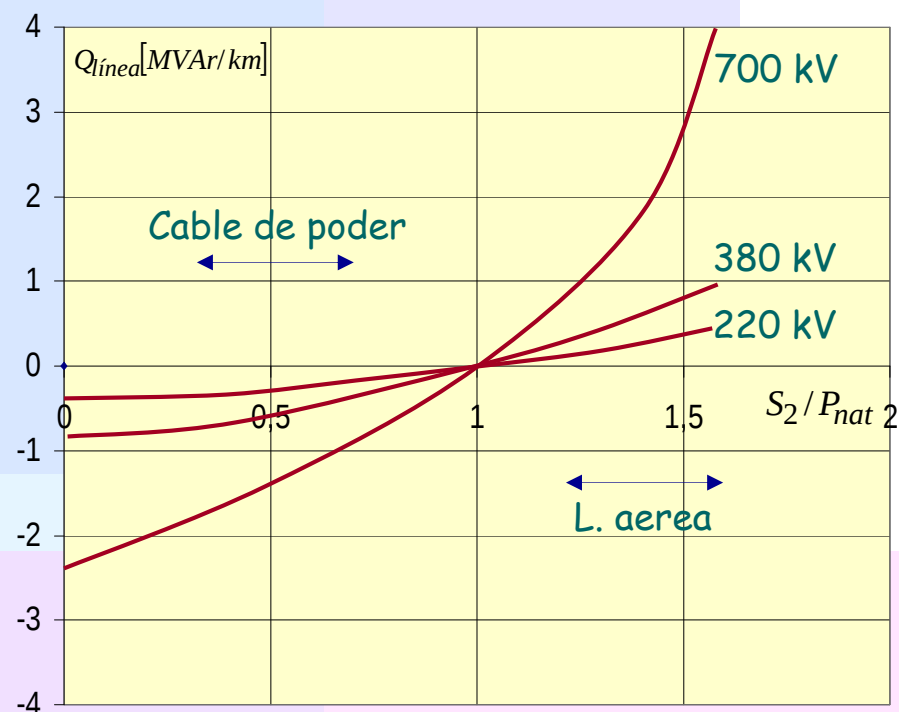
3. Requerimiento de reactivos de una línea

Caso línea sin pérdidas

$$Q_{línea} = Q_L + Q_C = \omega L I^2 - \omega C U^2$$



$$Q_{línea} = \omega C' Z_w P_{nat} \left[\left(\frac{S_2}{P_{nat}} \right)^2 - 1 \right]$$



Requerimiento de Reactivos
de líneas



Líneas de Transmisión (XXXI)

4. Resumen de Datos Generales de Líneas de Transmisión

UN/kV	10	60	110	220	380	700
Zw/Ohm	365	365	365	290*	240**	270**
Pnat/MW	0.3	10	33	165	600	1800

Parámetro	Línea aérea	Cable de poder
Distancia entre conductores	algunos m	algunos mm
Dieléctrico	Aire (permitividad relativa =1)	Aceite-Papel, Resina (permitividad relativa =2..6)
X'	0.4 .. 0.25 Ohm/km	0.08 .. 0.2 Ohm/km
C'	8 .. 14 nF/km	0.2 .. 0.7 μ F/km
Zw	400 .. 230 Ohm	35 .. 50 Ohm
Pnat	30 .. 630 MW (110 .. 380 kV)	300 .. 6300 MW (110 .. 380 kV)
Pérdidas	Pérdidas del conductor R Efecto corona Aislación	Pérdidas del conductor R Pérdidas dieléctricas Pérdidas en capa de protección, manto



Líneas de Transmisión (XXXII)

Modelo en mallas de secuencia (cálculo de fallas)

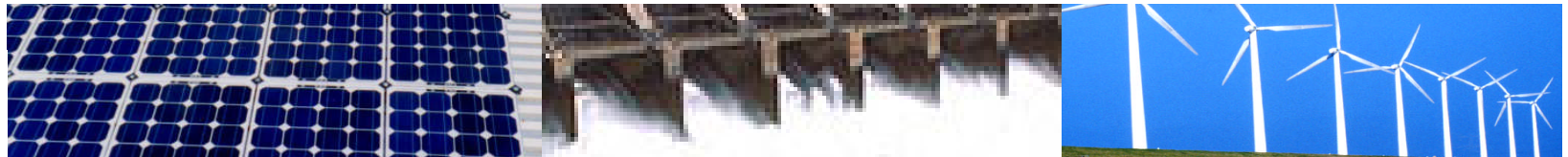
(+, -) secuencia positiva
y secuencia negativa

Por tratarse de un elemento estático, valores asociados a secuencias + y - son iguales. Se aplica todo lo visto hasta el momento.

(0) secuencia cero

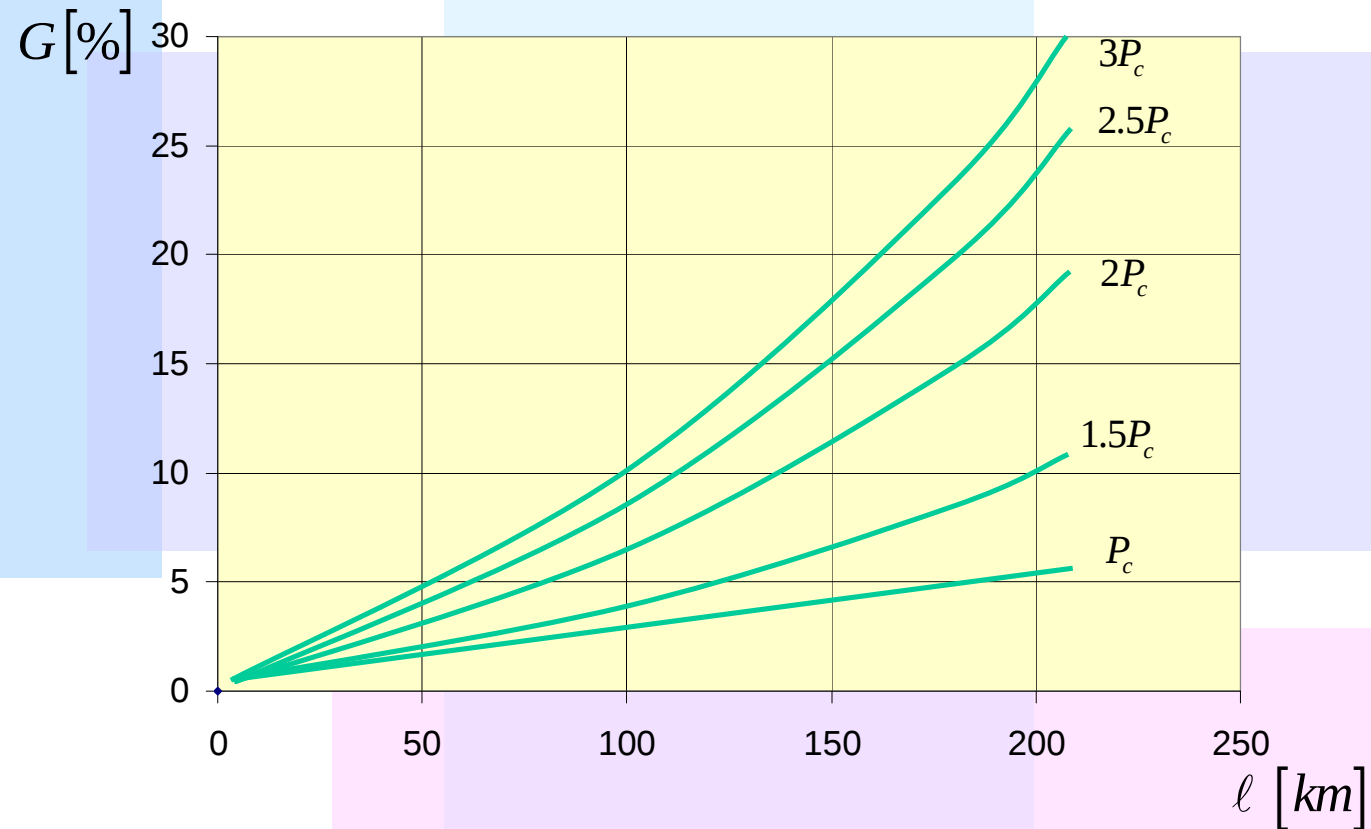
Para determinar la impedancia serie de secuencia cero hay que considerar tanto el efecto del retorno por tierra, como también los conductores de guardia de las líneas, en caso que ello existan, ya que la corriente se reparte entre ambos caminos. Dificultad de modelar la conductividad de la tierra debido a heterogeneidad de la resistividad de la tierra.

- Línea de simple circuito sin conductor de guardia
- Impedancia mutua de secuencia cero entre dos circuitos sin conductor de guardia
- Impedancia equivalente de secuencia cero de un doble circuito
- Impedancia equivalente de secuencia cero de dos líneas con tres terminales
- Línea de simple circuito con conductor de guardia



Líneas de Transmisión (XXXIII)

Información complementaria



Gradiente longitudinal en línea de transmisión de 154 kV



Líneas de Transmisión (XXXIV)

Información complementaria

$$V_1 = AV_2 + BI_2 \quad V_2 = \frac{V_1}{A} - B\frac{I_2}{A} \quad I_1 = CV_2 + DI_2 \quad I_2 = \frac{I_1}{D} - C\frac{V_2}{D}$$

$$V_1 = \frac{V_2}{D} + B\frac{I_1}{D} \quad V_2 = DV_1 - BI_1 \quad I_1 = D\frac{V_1}{B} - \frac{V_2}{B} \quad I_2 = \frac{V_1}{B} - A\frac{V_2}{B}$$

$$V_1 = A\frac{I_1}{C} - \frac{I_2}{C} \quad V_2 = \frac{I_1}{C} - D\frac{I_2}{C} \quad I_1 = C\frac{V_1}{A} + \frac{I_2}{A} \quad I_2 = AI_1 - CV_1$$

$$S_1 = V_1 I_1^*$$

$$S_2 = V_2 I_2^*$$

$$S_1 = C^* \frac{V_1^2}{A^*} + V_1 \frac{I_2^*}{A^*} \quad S_2 = V_2 \frac{I_1^*}{D^*} - C^* \frac{V_2^2}{D^*}$$

$$S_1 = D^* \frac{V_1^2}{B^*} - V_1 \frac{V_2^*}{B^*} \quad S_2 = V_2 \frac{V_1^*}{B^*} - A^* \frac{V_2^2}{B^*}$$

$$S_1 = V_2 \frac{I_1^*}{D} + B \frac{I_1^2}{D} \quad S_2 = V_1 \frac{I_2^*}{A} - B \frac{I_2^2}{A}$$

$$S_1 = A \frac{I_1^2}{C} - I_2 \frac{I_1^*}{C} \quad S_2 = I_1 \frac{I_2^*}{C} - D \frac{I_2^2}{C}$$

Capacidad de transmisión de un tetrapolo



Líneas de Transmisión (XXXV)

Información complementaria

$$P_1 = \frac{D}{B} V_1^2 \cos(\beta - \delta) - \frac{V_1 V_2}{B} \cos(\beta + \theta)$$

$$Q_1 = \frac{D}{B} V_1^2 \sin(\beta - \delta) - \frac{V_1 V_2}{B} \sin(\beta + \theta)$$

$$P_2 = \frac{V_1 V_2}{B} \cos(\beta - \theta) - \frac{A}{B} V_2^2 \cos(\beta - \alpha)$$

$$Q_2 = \frac{V_1 V_2}{B} \sin(\beta - \theta) - \frac{A}{B} V_2^2 \sin(\beta - \alpha)$$

$$S_2 = P_2 + j Q_2 = -\frac{A}{B} V_2^2 \angle (\beta - \alpha) + \frac{V_1 V_2}{B} \angle (\beta - \theta)$$

$$= -\frac{A}{B} V_2^2 \angle (\beta - \alpha) + \frac{V_1 V_2}{B} \angle e^{-j \theta}$$

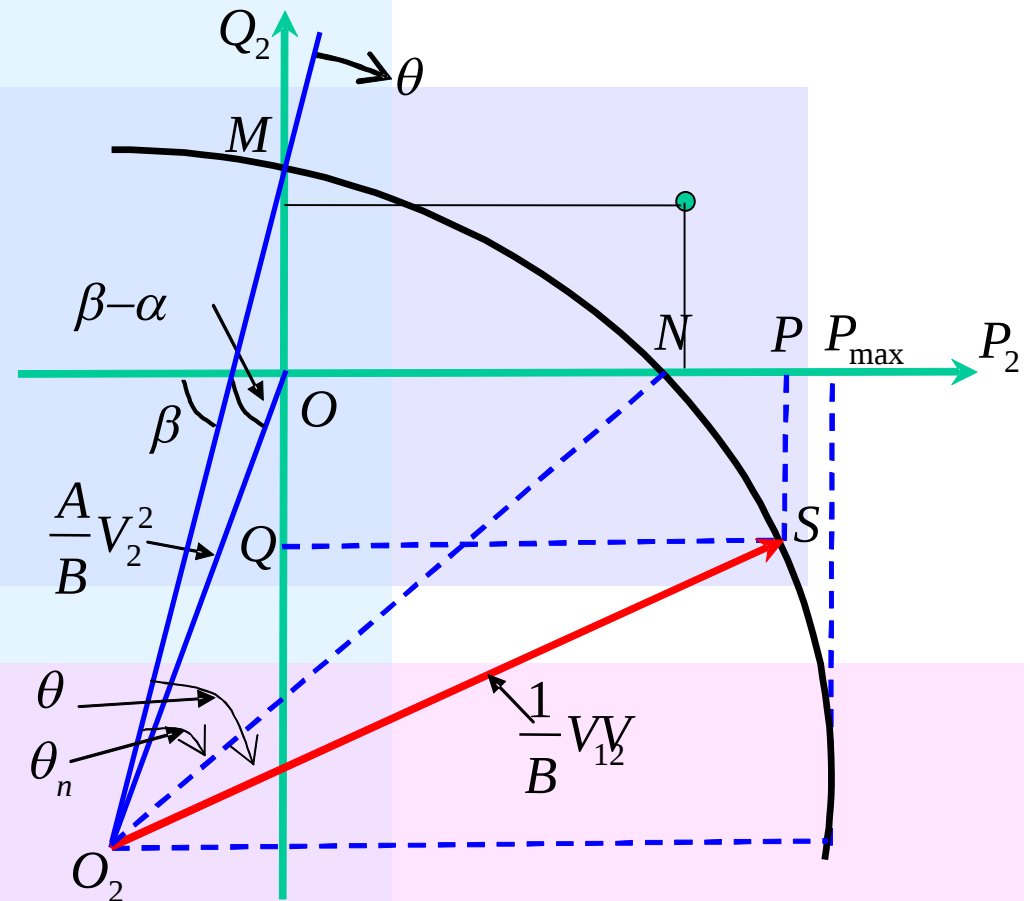
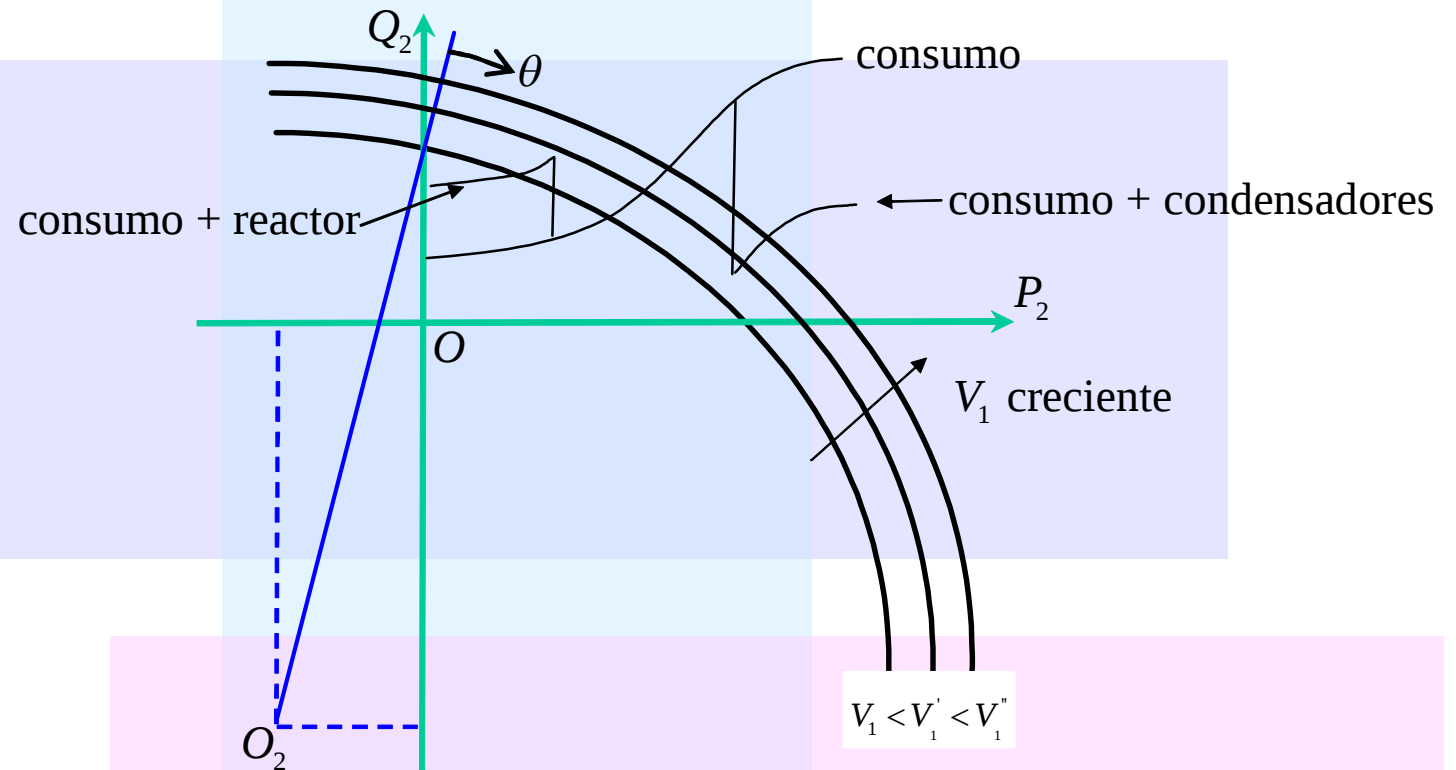


Diagrama del extremo receptor



Líneas de Transmisión (XXXVI)

Información complementaria



Extremo receptor con V_1 variable



Líneas de Transmisión (XXXVII)

Información complementaria

$$S_1 = P_1 + j Q_1 = \frac{D}{B} V_1^2 \angle (\beta - \delta) - \frac{V_1 V_2}{B} \angle \beta e^{j \theta}$$

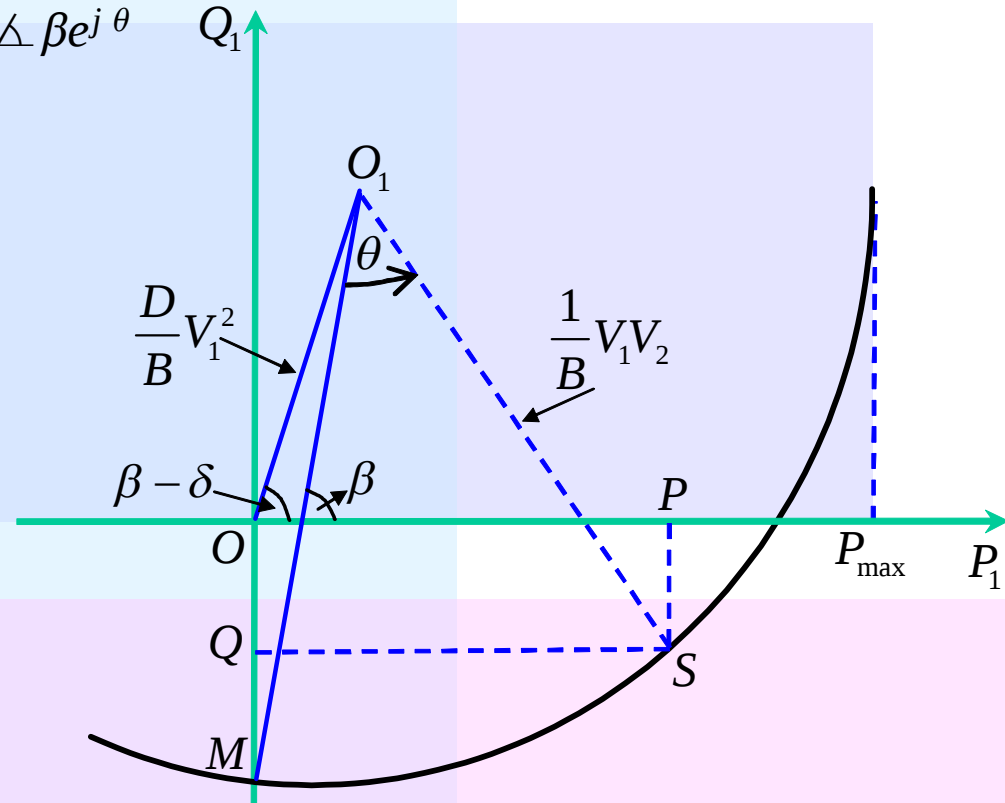
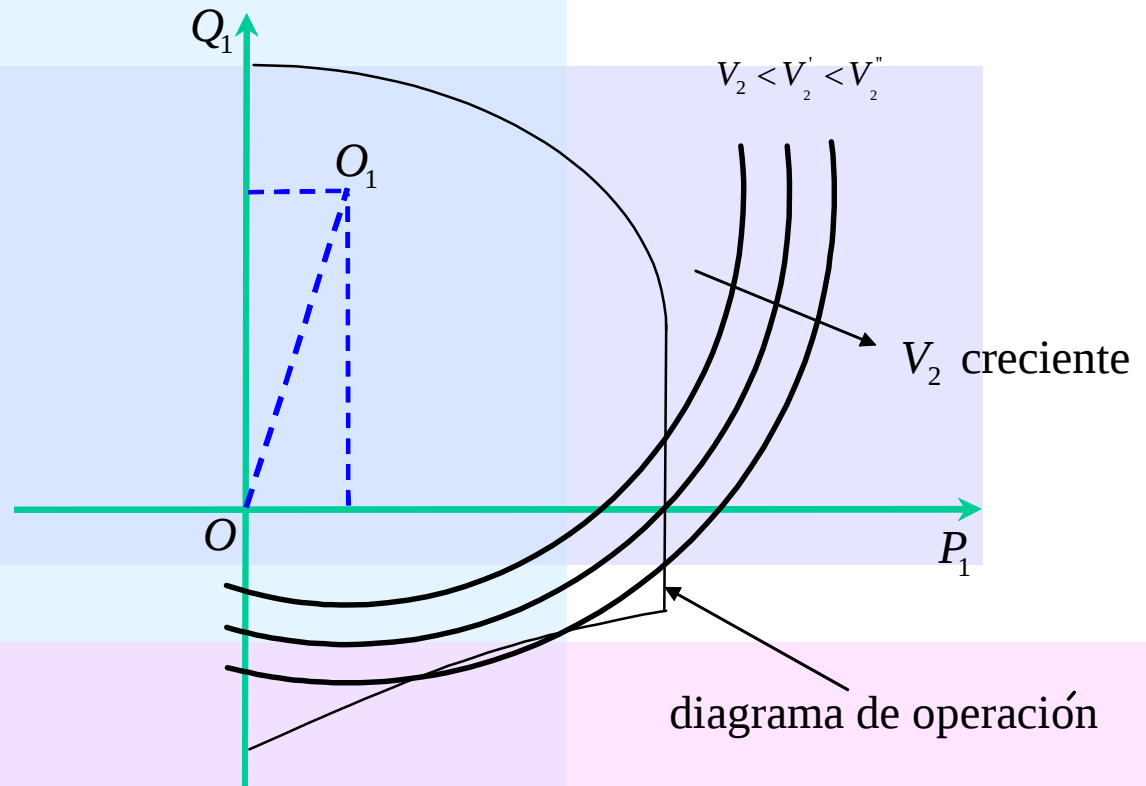


Diagrama del extremo transmisor



Líneas de Transmisión (XXXVIII)

Información complementaria



Extremo emisor con V_2 variable