



EL 57A SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA

Clase 10: Redes de Transmisión y Subestaciones

Luis Vargas
AREA DE ENERGIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA ELECTRICA



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

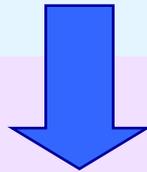


3.5 Redes de Transmisión y Subestaciones (I)

Equipos de Transmisión Flexible

Equipos de transmisión flexible o FACTS (Flexible AC Transmission Systems) son un conjunto de aplicaciones de electrónica de potencia que permiten actuar sobre variables de un sistema eléctrico, en particular los flujos.

- Gran desarrollo de dispositivos de electrónica de potencia (tiristores, GTO, IGBT, etc.)
- Nuevos requerimientos en función del nivel de desarrollo de un país y de la estructura de mercado establecida.

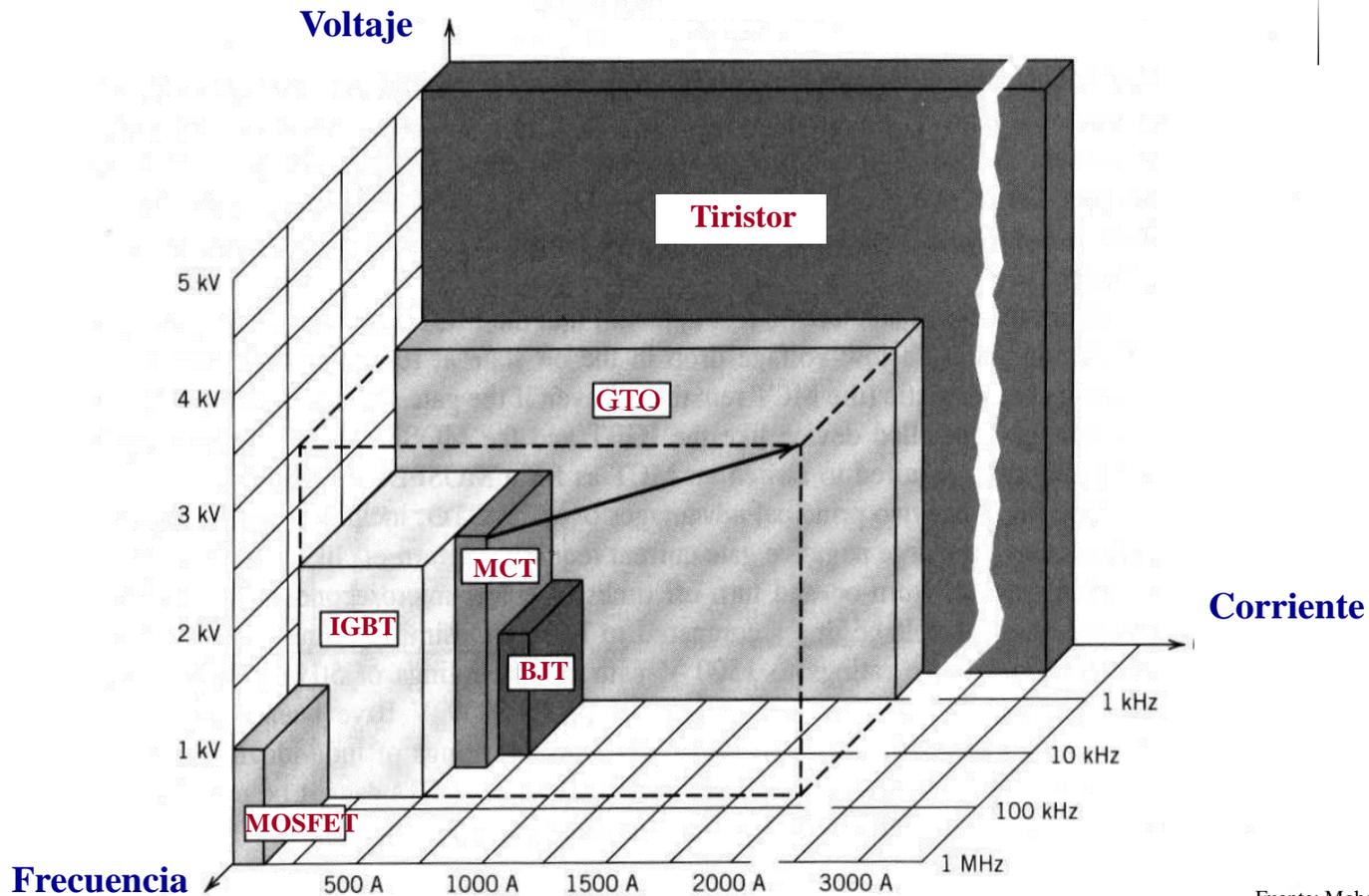


- Líneas de transmisión en corriente continua
- Equipos FACTSs



3.5 Redes de Transmisión y Subestaciones (II)

Resumen de Capacidad de Semiconductores

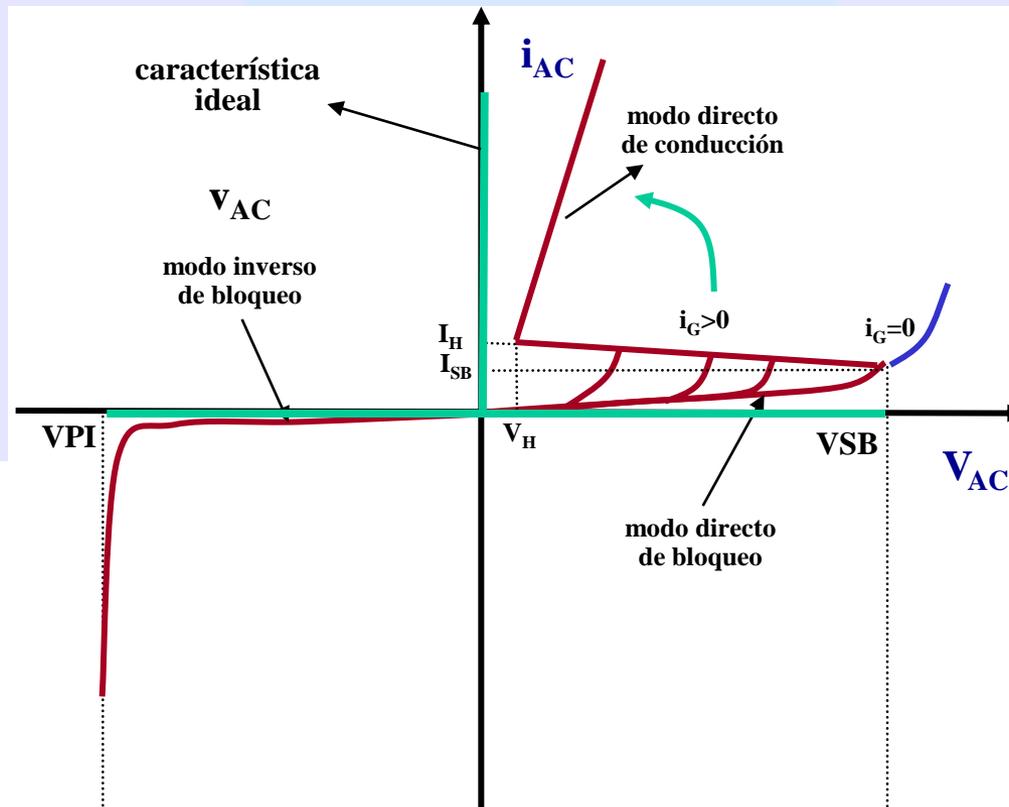


Fuente: Mohan, Undeland, Robbins



3.5 Redes de Transmisión y Subestaciones (III)

Curva Voltaje Corriente del Tiristor





Problemas Técnicos en sistemas alternos

Sistemas Interconectados

- Control de los flujos de potencia
- Estabilidad de voltaje
- Oscilaciones sistémicas
- Oscilaciones entre áreas

Sistemas de transmisión de larga distancia

- Regulación de voltaje
- Control de reactivos
- Estabilidad permanente
- Estabilidad dinámica

Tipos de Controladores FACTS

En sistemas de Transmisión

- Compensación estática (Static Var Compensator SVC)
- STATCOM
- Compensación serie controlada por tiristores (Thyristor Controlled Series Compensator (TCSC))
- Compensación serie estática sincrónica (Static Synchronous Series Compensator SSSC)
- Regulador de fase de ángulo controlado por tiristores (Thyristor Controlled Phase Angle Regulator (TCPAR))
- Controlador unificado de flujo (Unified Power Flow Controller (UPFC))

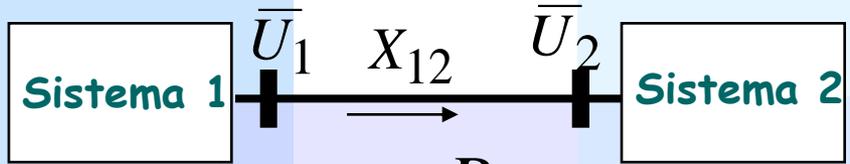
Aplicaciones Especiales

- Bobinas magnéticas superconductores para almacenamiento de energía (SMES)
- Resistencia de corte controlada por tiristores.
- Limitador de voltaje controlado por tiristores.
- Limitadores de corriente

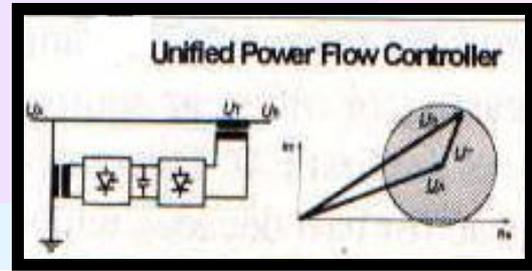
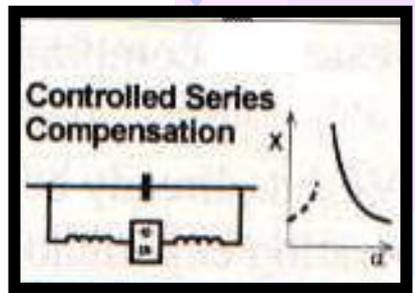
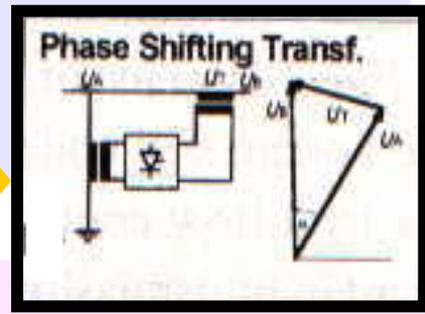
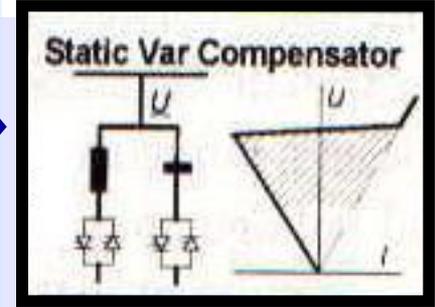


3.5 Redes de Transmisión y Subestaciones (V)

Forma de control de flujo y mejora de estabilidad de equipos FACTS



$$P_{12} = \frac{U_1 U_2}{X_{12}} \sin(\delta_1 - \delta_2)$$



Fuente:Povh

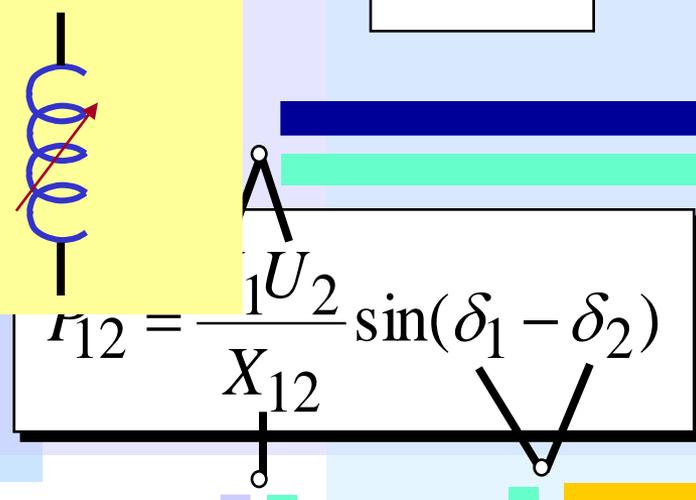


3.5 Redes de Transmisión y Subestaciones (VI)

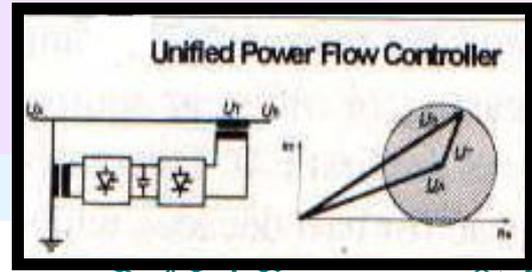
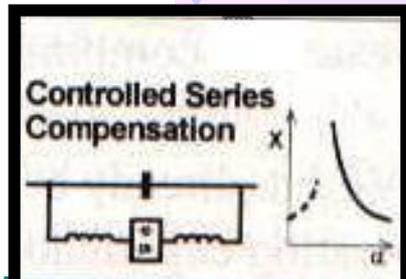
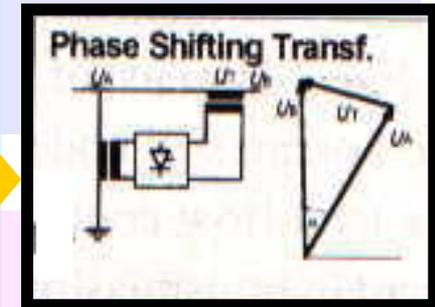
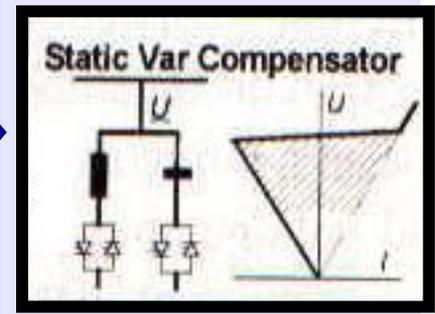
Representación de mejora de estabilidad de equipos FACTS

Pasiva,
Activa

Sistema 2



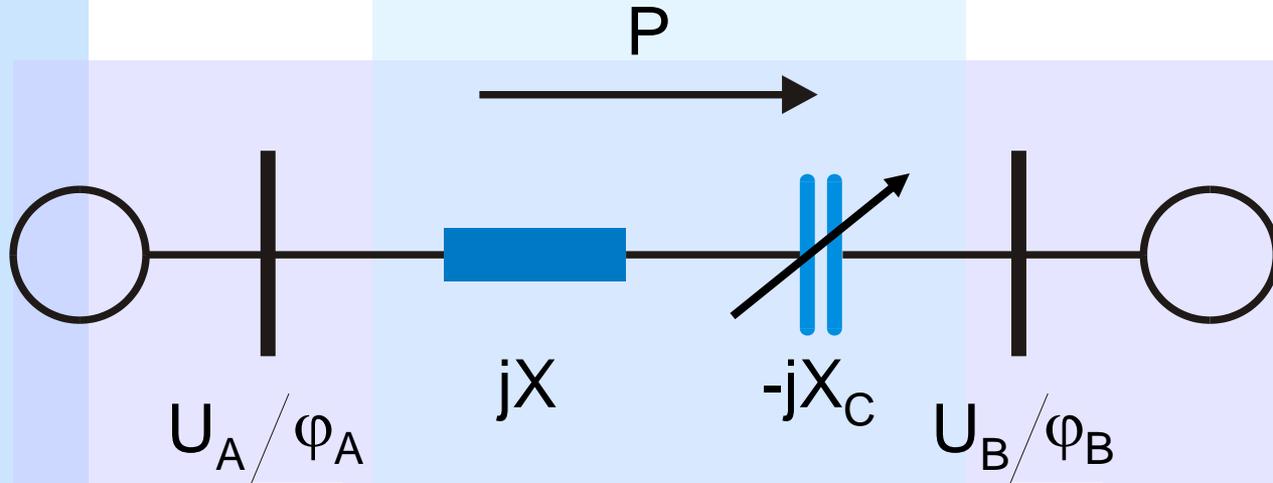
$$r_{12} = \frac{1}{X_{12}} \sin(\delta_1 - \delta_2)$$





3.5 Redes de Transmisión y Subestaciones (VII)

CASO FACTS THYRISTOR CONTROLLED SERIES CAPACITOR (TCSC)



$$P = \frac{U_A U_B \sin(\varphi_A - \varphi_B)}{X - X_C}$$

Fuente: ABB



3.5 Redes de Transmisión y Subestaciones (VIII)

CASO FACTS UPFC

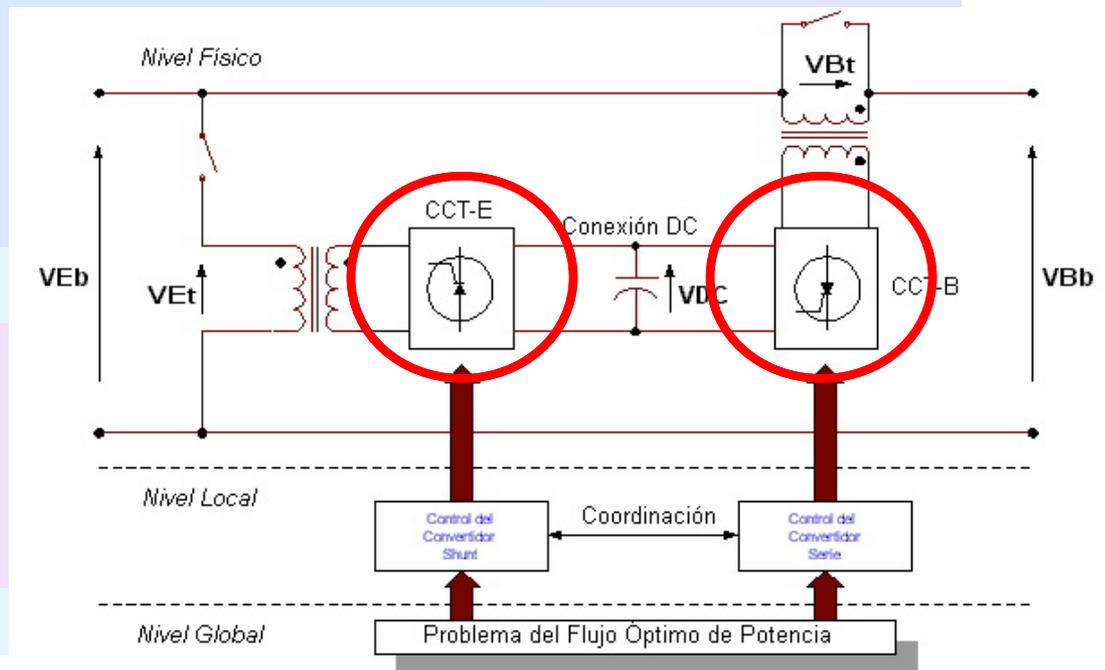
Modelos de Operación Descripción del UPFC

Control Unificado

- Control de Tensión
- Compensación reactiva
- Control de Flujos

Operador de Red

- Coordinación Convertidores
- Especificaciones de OPF o Despacho

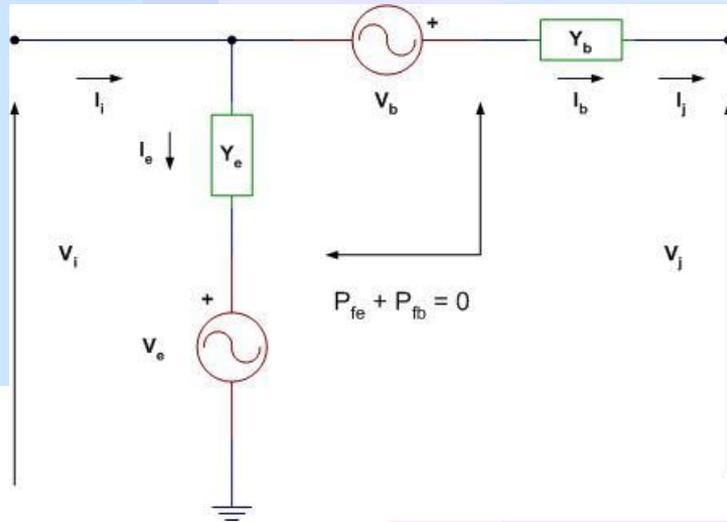




3.5 Redes de Transmisión y Subestaciones (IX)

CASO FACTS UPFC

Modelos de Operación Modelo Matemático del UPFC (I)



- Distintos modelos de representación**
- Modelo de fuentes de tensión combinadas
 - Modelo de fuentes de corriente

$$S_i = V_i \bar{I}_i = V_i^2 (\bar{Y}_e + \bar{Y}_b) - V_i \bar{V}_j \bar{Y}_b + V_i (\bar{V}_b \bar{Y}_b - \bar{V}_e \bar{Y}_e)$$

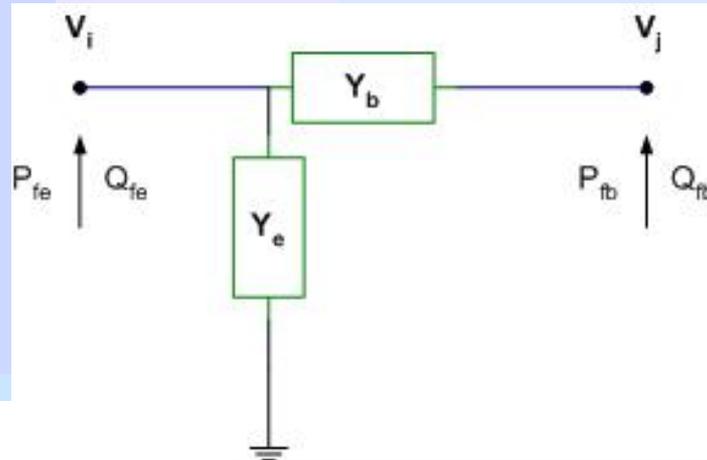
$$S_j = V_j \bar{I}_j = V_j^2 (\bar{Y}_b) - V_j \bar{V}_i \bar{Y}_b + V_j (-\bar{V}_b \bar{Y}_b)$$



3.5 Redes de Transmisión y Subestaciones (X)

CASO FACTS UPFC

Modelos de Operación Modelo Matemático del UPFC (II)



$$S_i^{INJ} = V_i(\bar{Y}_b \bar{V}_b - \bar{Y}_e \bar{V}_e) = P_i^{INJ} + jQ_i^{INJ}$$

$$S_j^{INJ} = -V_j \bar{Y}_b \bar{V}_b = P_j^{INJ} + jQ_j^{INJ}$$

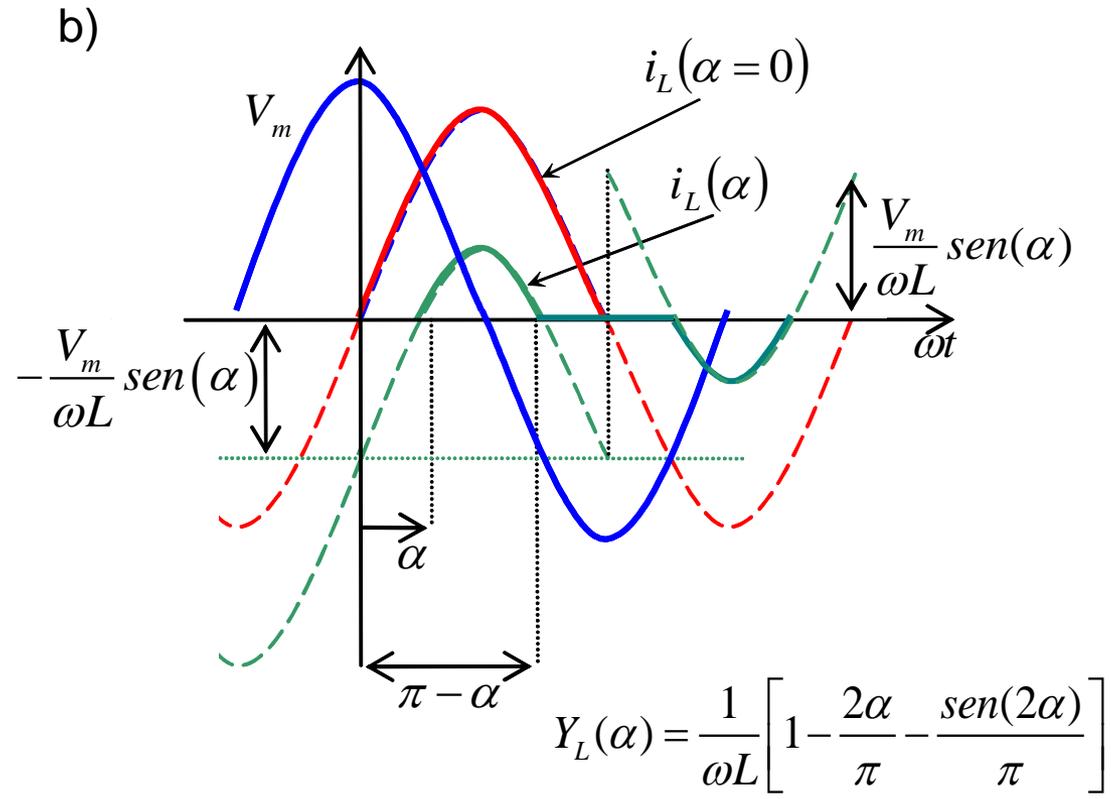
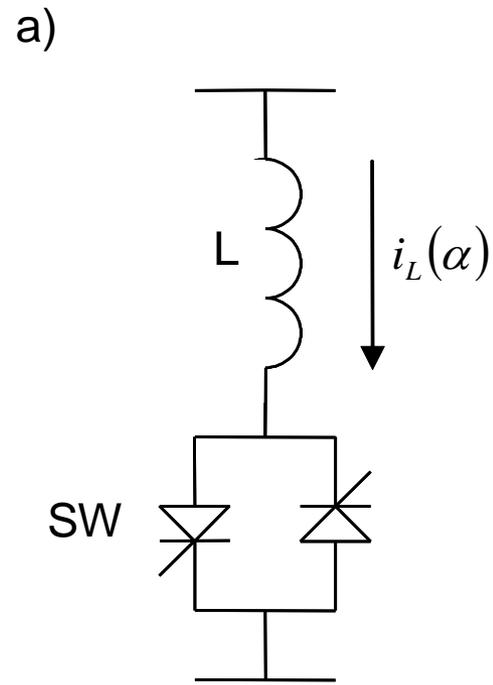
Dificultad en el manejo de fuentes de tensión

- Acoplamiento con modelos nodo-rama de FP
- Permite separar el efecto de los convertidores en la matriz de admitancia y en las inyecciones de potencia



3.5 Redes de Transmisión y Subestaciones (XIV)

Ejemplo: Compensación estática de reactivos (Static Var Compensator SVC)





3.5 Redes de Transmisión y Subestaciones (XI)

Ventaja de Controladores FACTS en Sistemas Alternos

	Control de Flujos	Control de Voltaje	Estabilidad Transiente	Oscilaciones	
SVC/STATCOM Static Var Compensator/STATCOM					Influencia : baja : media : alta
TCSC Thyristor Controlled Series Compensator					
SSSC Static Synchronous Series Compensator					
TCPAR Thyristor Controlled Phase Angle Regulator					
UPFC Unified Power Flow Controller					

Fuente:Povh

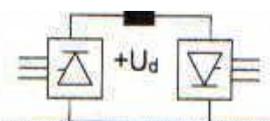


Líneas de Transmisión en Continua (HVDC)

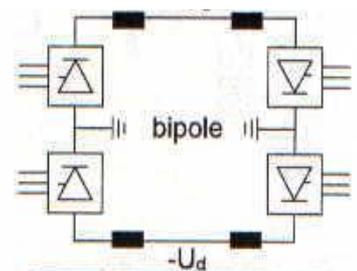
Tipos de Conexión en corriente continua

Situación en Europa

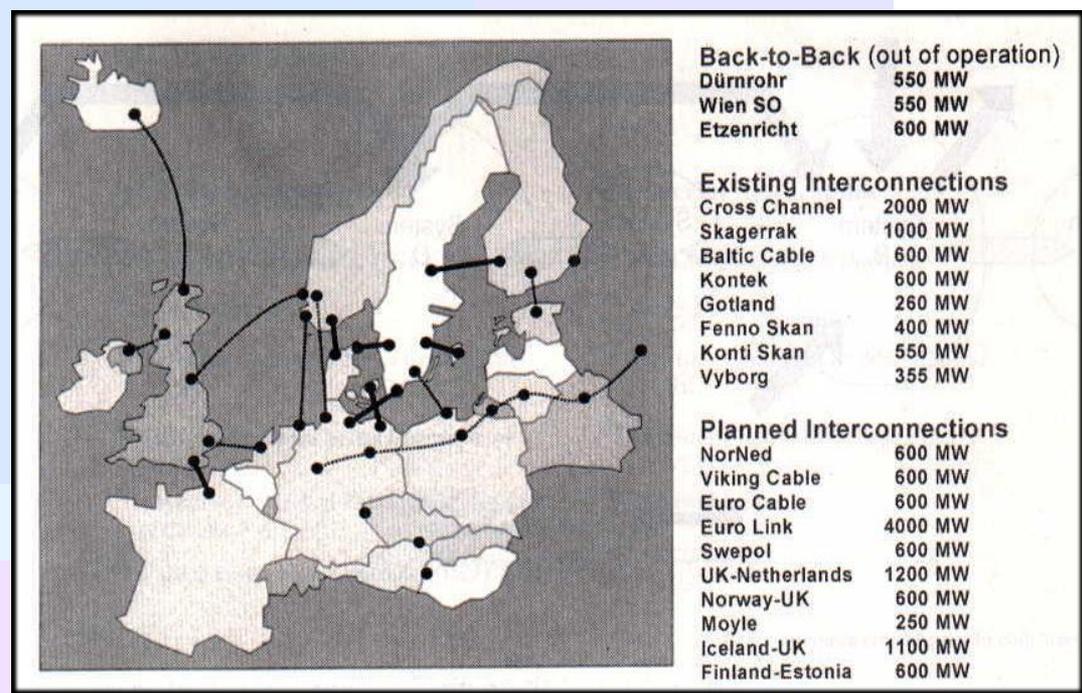
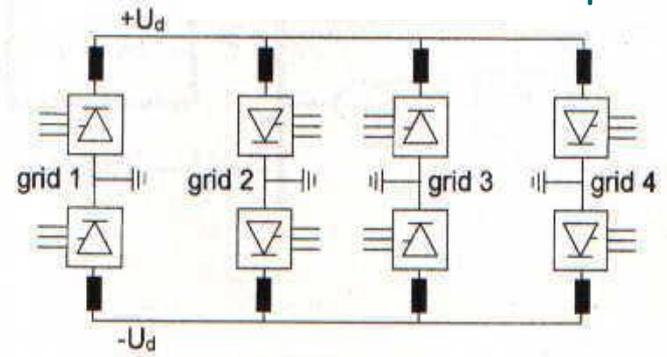
Conexión Back to Back



Conexión HVDC de larga distancia (bipolar)



Conexión HVDC de terminal múltiple

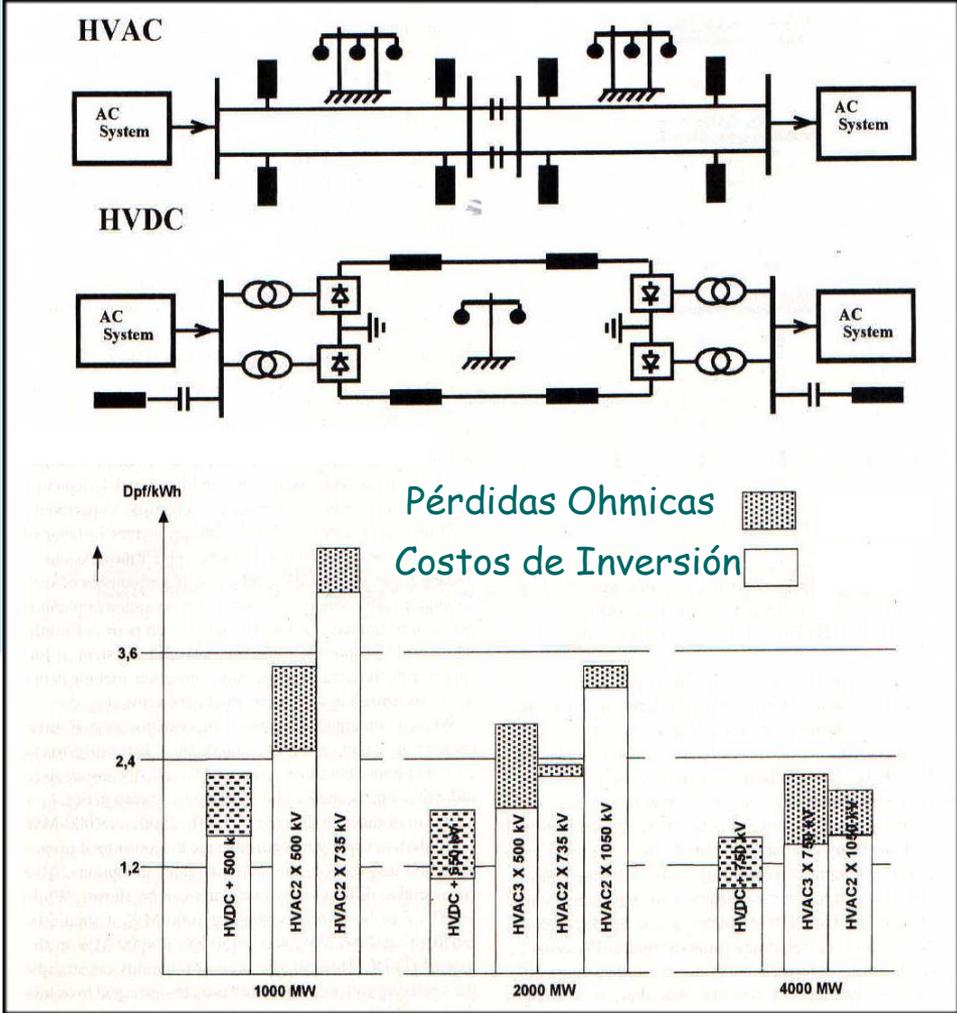


Fuente:Povh



3.5 Redes de Transmisión y Subestaciones (XIII)

Análisis Económico



Ventajas respecto de sistemas de corriente alterna

- Costos menores de líneas
- Control coordinado de voltaje no necesario
- Conexión estable para transferencias bajas
- Mejora de condiciones dinámicas de sistema de corriente alterna

Desventajas respecto de sistemas de corriente alterna

- Costo de dispositivos ?
- Contaminación armónica ?

Estudio comparativo HVDC, HVAC para transmisiones a distancia de 1200 km

Fuente:Povh

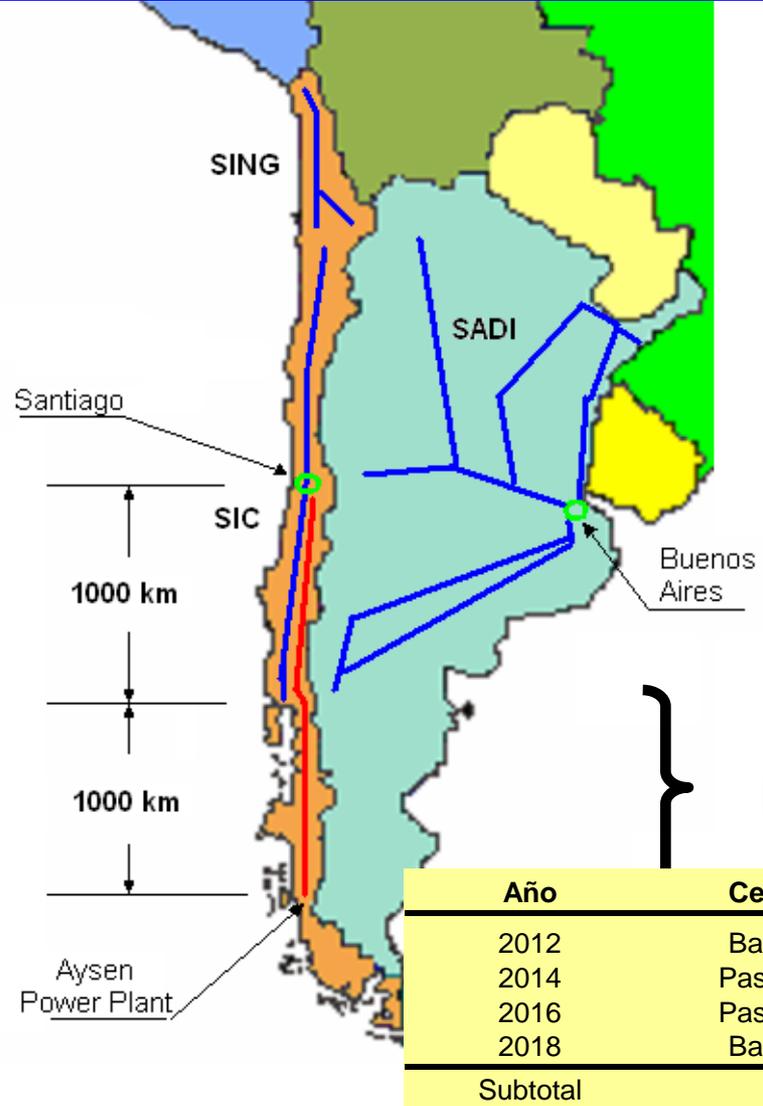


Proyectos HVDC en operación y construcción

PROJECT	POWER MW	DC VOLTAGE kV	CONV. PER STAT.	LENGTH OF DC LINE	CONVERTER STATIONS	MAIN SUPPLIER CONVERTERS	COMMISSIONING YEAR	POWER COMPANY
QUEBEC								
Québec-New England	2000 multiterminal	+/- 450	2	1480	Radisson 315 kV Nicolet 230 kV Sandy Point 345 kV	ABB	1990, 1992	Hydro Québec (Montreal)
CHINA								
Gezhouba-Shanghai	1200	+/- 500	2	1046	Gezhouba 500 kV Nan Qiao 230 kV	Siemens/ABB	1989 Pole 1 1990 Bipole	Central China Electric Power Adm. (Wuhan) East China Electric Power Adm. (Shanghai)
Tianshengqiao-Guangzhou	1800	+/- 500	2	960	Tianshengqiao 230 kV Guangzhou 230 kV	Siemens	2000	South China Electric Power (SCEP)
Three Gorges-Changzhou	3000	+/- 500	2	890	Longquan 500 kV Zhengping 500 kV	ABB	2002 Pole 1 2003 Bipole	China Power Grid Development (Beijing)
Three Gorges-Guangdong	3000	+/- 500	2	940	Jingzhou 500 kV Huizhou 500 kV	ABB	2004	State Power Corporation of China (SPCC)
Guizhou-Guangdong I	3000	+/- 500	2	980	Anshun 500 kV Zhaoqing 500 kV	Siemens	2004	State Power Southern Company (SPSC)
Three Gorges-Shanghai	3000	+/- 500	2	1060	Yidu 500 kV Huaxin 500 kV	ABB-Chinese Consortium	2007	State Grid Corporation of China (SGCC)
Guizhou-Guangdong II	3000	+/- 500	2	1225	Xingren 500 kV Shenzhen 500 kV	Siemens	2007	State Power Southern Company (SPSC)
INDIA								
Rihand-Delhi	1568	+/- 500	2	814	Rihand 400 kV Dadri 400 kV	BHEL, ABB	1990	National Thermal Power Corp. (New Delhi)
Chandrapur-Padghe	1500	+/- 500	2	736	Chandrapur 400 kV Padghe 400 kV	ABB, BHEL	1998	Maharashtra State Electric Board (Bombay)
East-South Interconnector	2000	+/- 500	2	1450	Talcher 400 kV Kolar 400 kV	Siemens	2003	Power Grid Corporation of India
BRASIL								
Itaipu	3150 3150	+/- 600 +/- 600	4 4	785 805	Foz do Iguacu 500 kV Ibiuna 345 kV	ABB	1984, 1985, 1987	Furnas (Rio de Janeiro)



SISTEMA DE TRANSMISIÓN AYSÉN-SIC (08/2006)



Trazado de la línea de transmisión

- Sólo en territorio Chileno

Tipo de solución

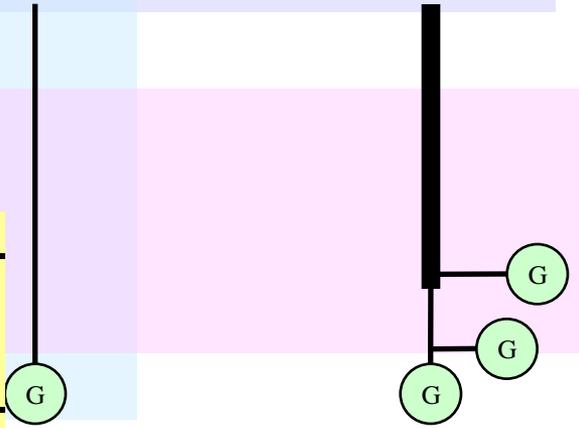
Desarrollo para un proyecto único (Endesa-Colbún)

(proyecto y tecnología no escalable)

Desarrollo para el potencial de la zona

(proyecto escalable)

Año	Central	Capacidad
2012	Baker 1	680 MW
2014	Pascua 2	940 MW
2016	Pascua 1	450 MW
2018	Baker 2	360 MW
Subtotal		2430 MW



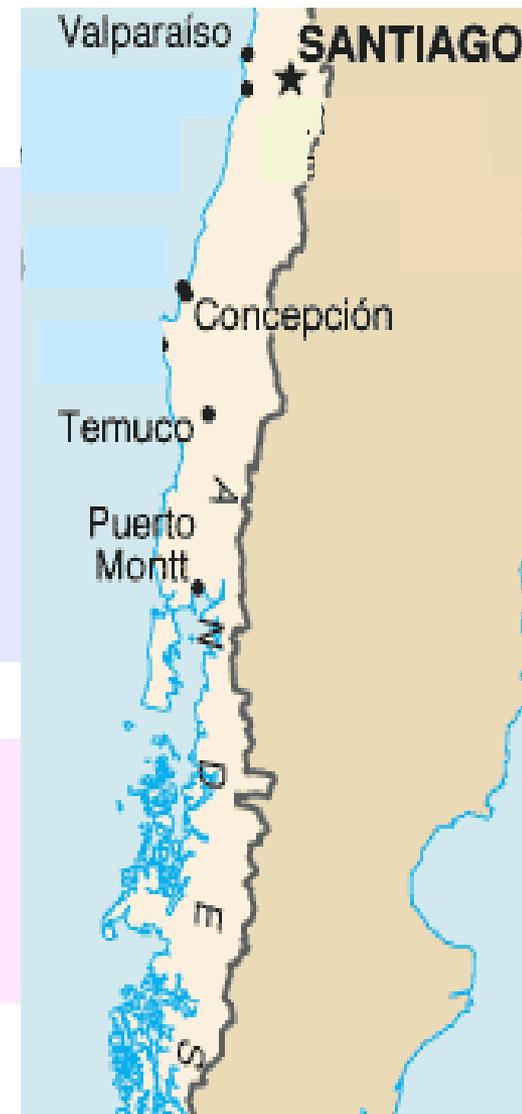
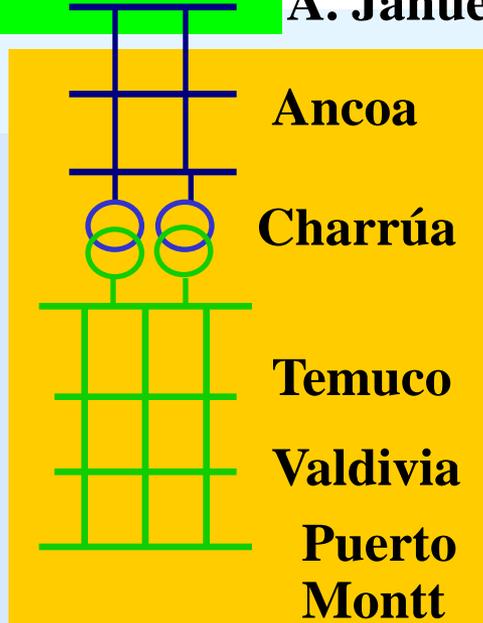
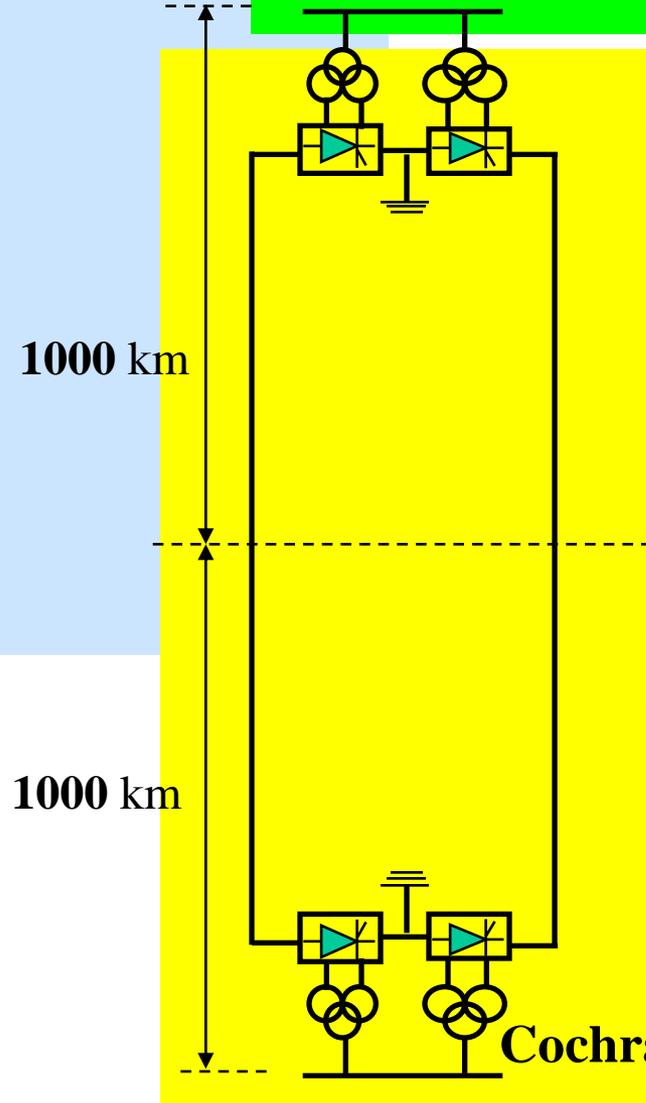
Escenario 2012



Universidad de Chile

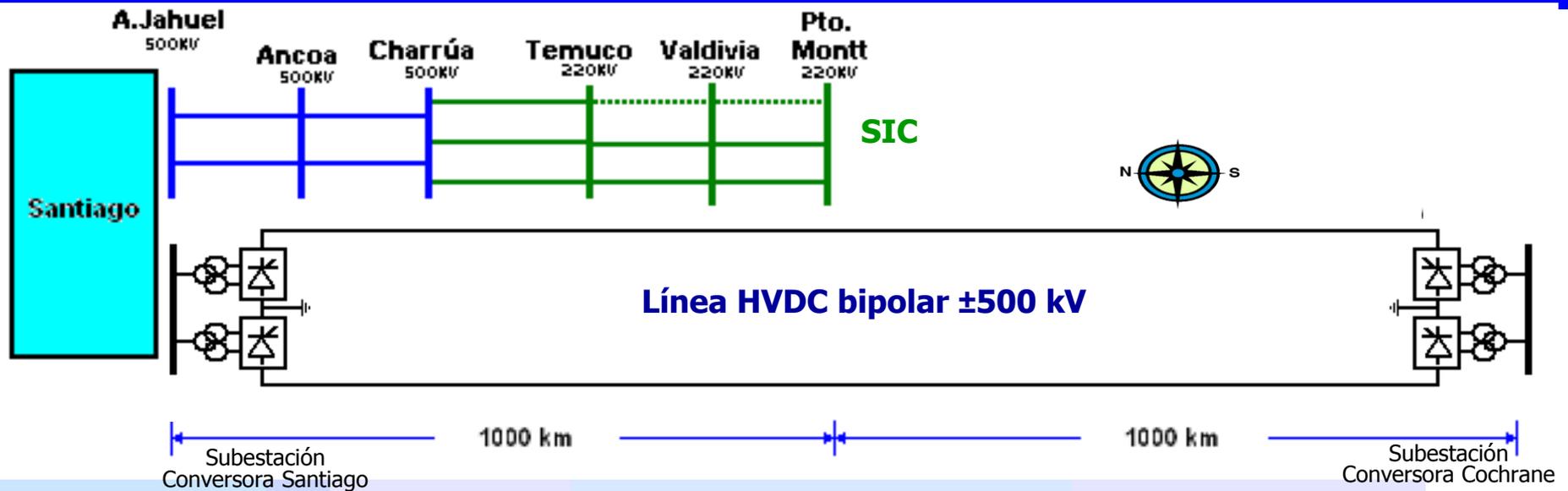
Santiago

A. Jahuel





Diseño del Sistema de Transmisión



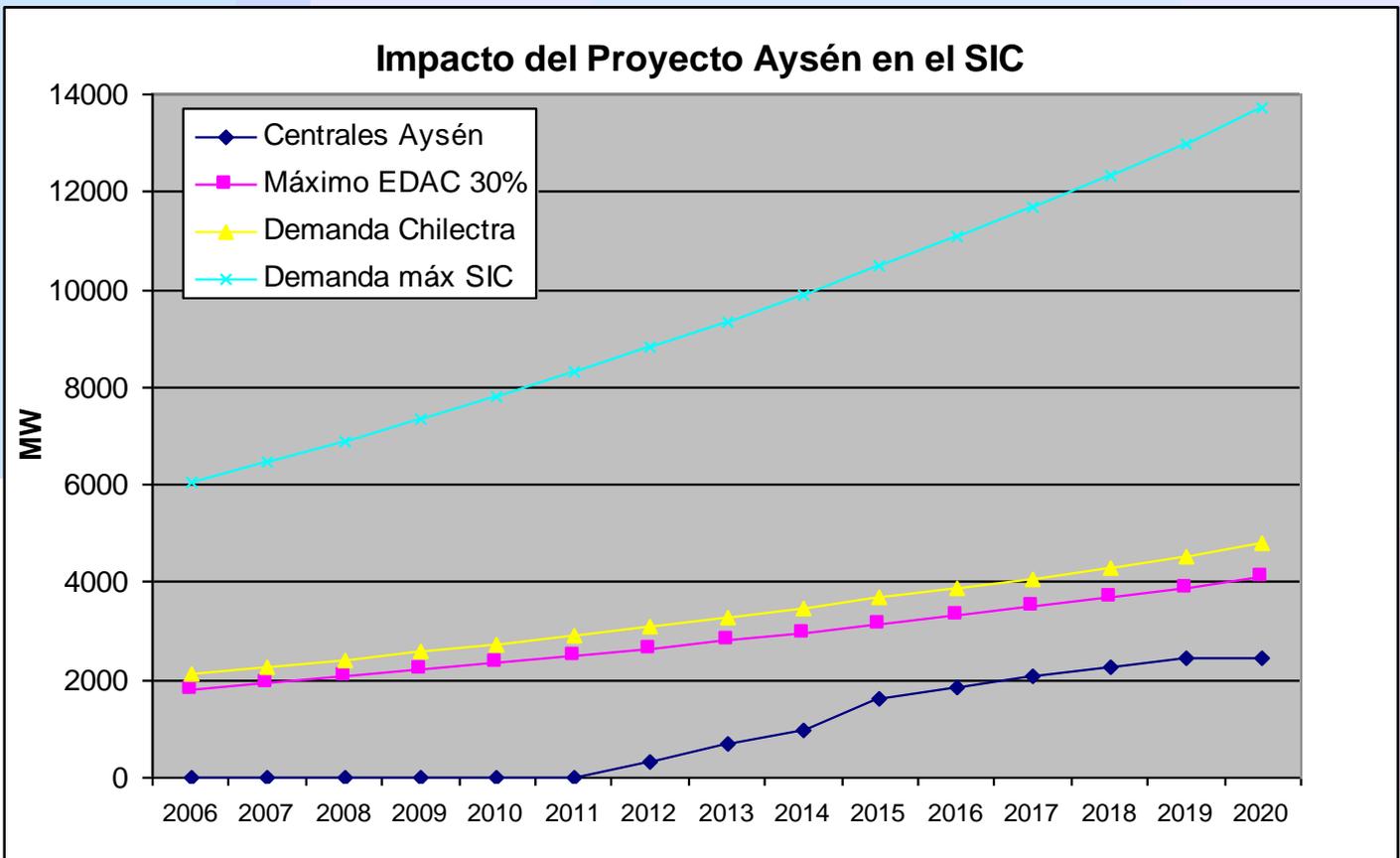
Consideraciones:

- Potencia (2400 MW) y distancia (2000 km) implica ± 500 kV o ± 600 kV
- Experiencia mundial en sistemas HVDC largos:
 - China: ± 500 kV, 3000 MW, 1225 km
 - India: ± 500 kV, 2000 MW, 1450 km
 - Brasil: ± 600 kV, 3150 MW, 800 km
- Restricción ante eventual uso de cable en un tramo (limitación a 500 kV)
- Diseño de la línea debe ser muy confiable en el tramo Cochrane-Puerto Montt
- Conexión AC en Santiago: 500 kV o 220 kV



Impacto de las Centrales de Aysén en el SIC

	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Demanda máx SIC	6068	6462	6882	7330	7806	8314	8813	9341	9902	10496	11073	11682	12325	13003	13718
Tasa crecimiento		6,5%	6,5%	6,5%	6,5%	6,5%	6,0%	6,0%	6,0%	6,0%	5,5%	5,5%	5,5%	5,5%	5,5%
Demanda Chilectra	2124	2262	2409	2565	2732	2910	3084	3269	3466	3674	3876	4089	4314	4551	4801
Máximo EDAC 30%	1820	1939	2065	2199	2342	2494	2644	2802	2971	3149	3322	3505	3697	3901	4115
Centrales Aysén	0	0	0	0	0	0	340	680	993	1620	1845	2070	2250	2430	2430



Centrales Aysén

2012 BAKER 1 680 MW
 2014 PASCUA 2 940 MW
 2016 PASCUA 1 450 MW
 2018 BAKER 2 360 MW
TOTAL: 2430 MW



Diseño del Sistema de Transmisión para el Potencial de la Zona

Definiciones básicas

- Una línea bipolar ± 500 kV: capacidad máxima aproximadamente 2500 MW
- Una línea bipolar ± 800 kV: capacidad máxima aproximadamente 5000 MW

Aspectos constructivos

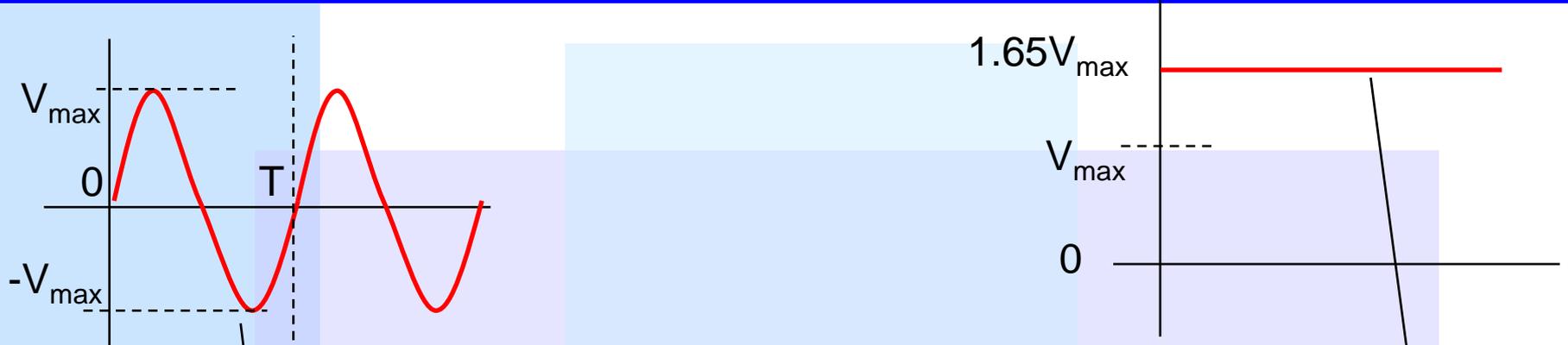
- En la zona de Pumalín, por ejemplo, podría ser posible construir sólo una línea aérea. Si se requiere usar cables subterráneos, el nivel de tensión se restringe automáticamente a ± 500 kV.

Potencial de desarrollo

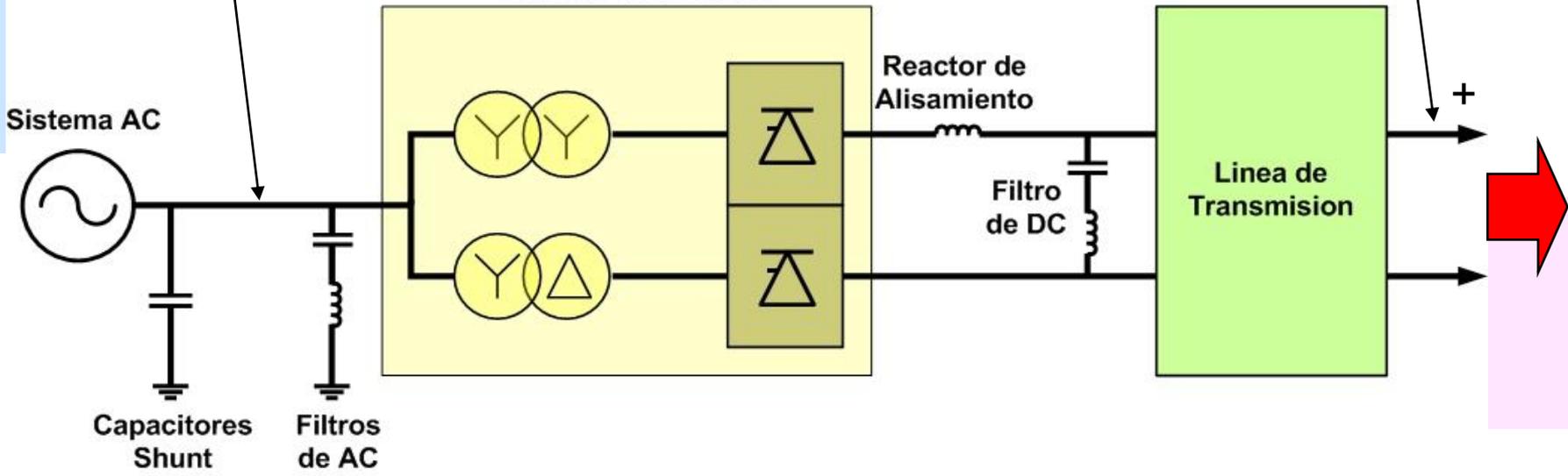
- 1) 2500 MW -> Una línea bipolar ± 500 kV
- 2) 5000 MW sobre un período de varios años
 - a) Si el desarrollo se inicia en ± 500 kV, entonces se requieren dos líneas bipolares, que en la zona de Pumalín podrían ser una aérea y la otra subterránea
 - b) Un bipolo operado inicialmente en ± 400 kV y eventualmente ampliado a ± 800 kV (con dos convertoras en serie).
En este caso la línea bipolar tendría que ser diseñada para ± 800 kV desde el inicio

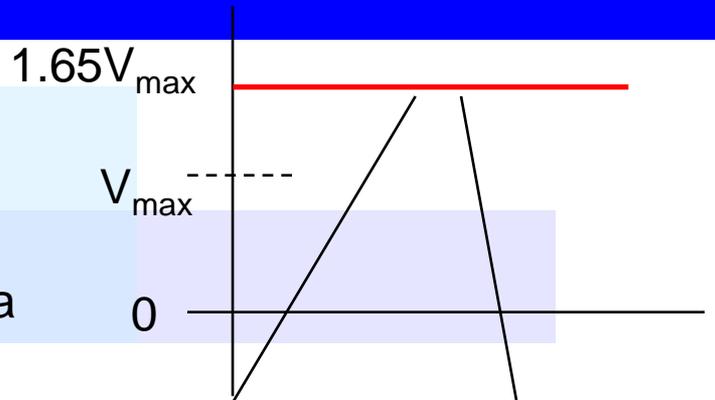
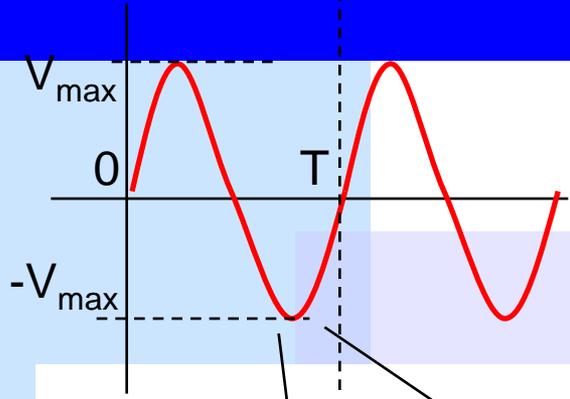


Terminal Emisor

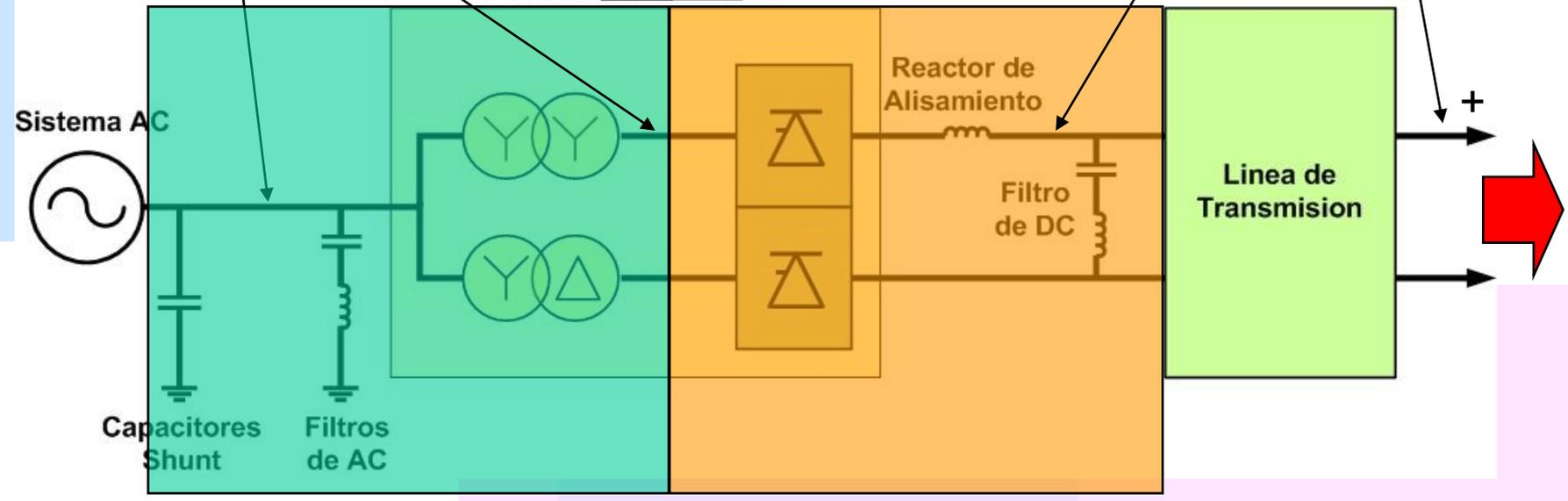
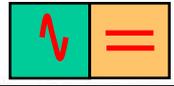


Transformadores
y
Valvulas a Tiristores





Subestación Convertidora

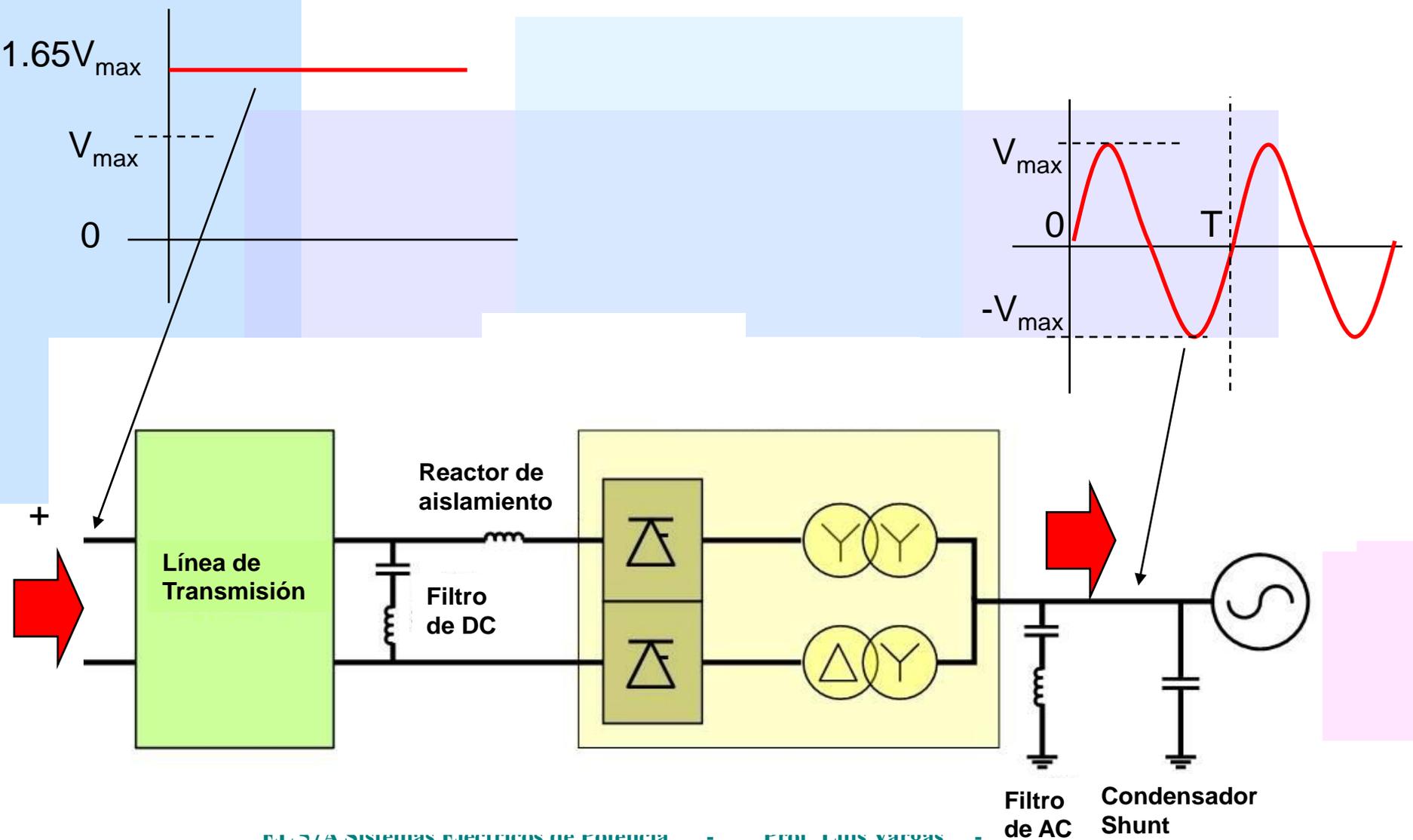


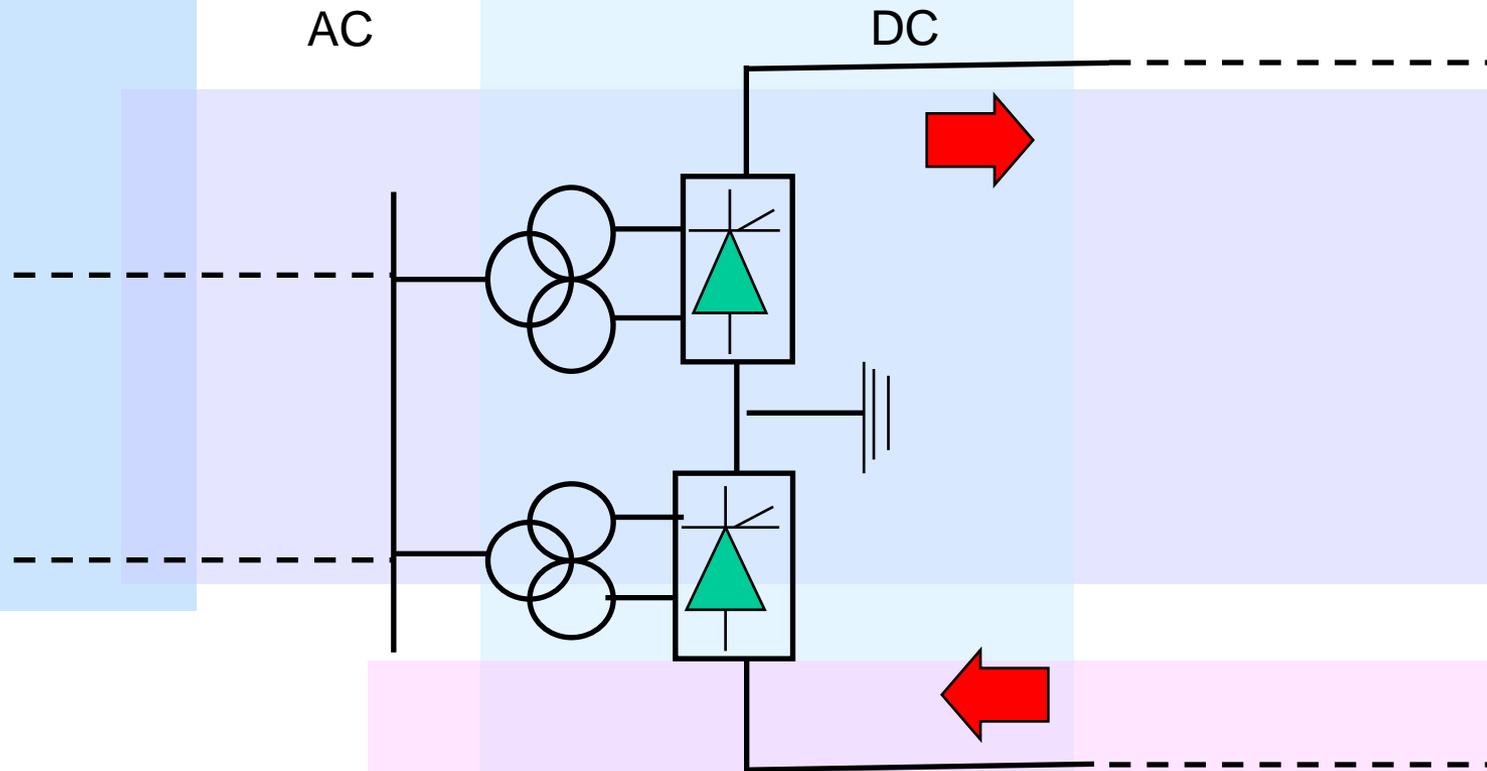
AC

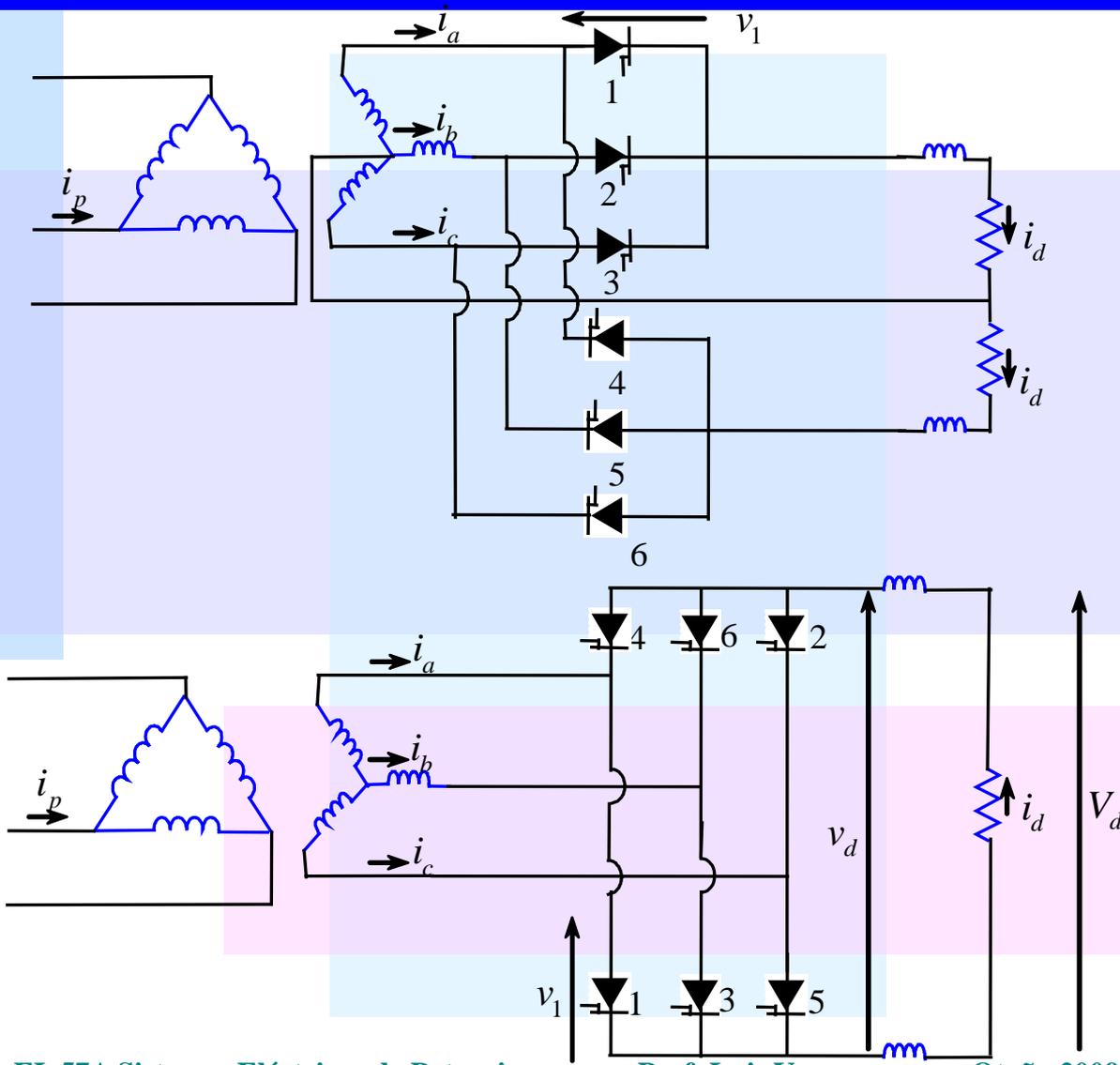
DC

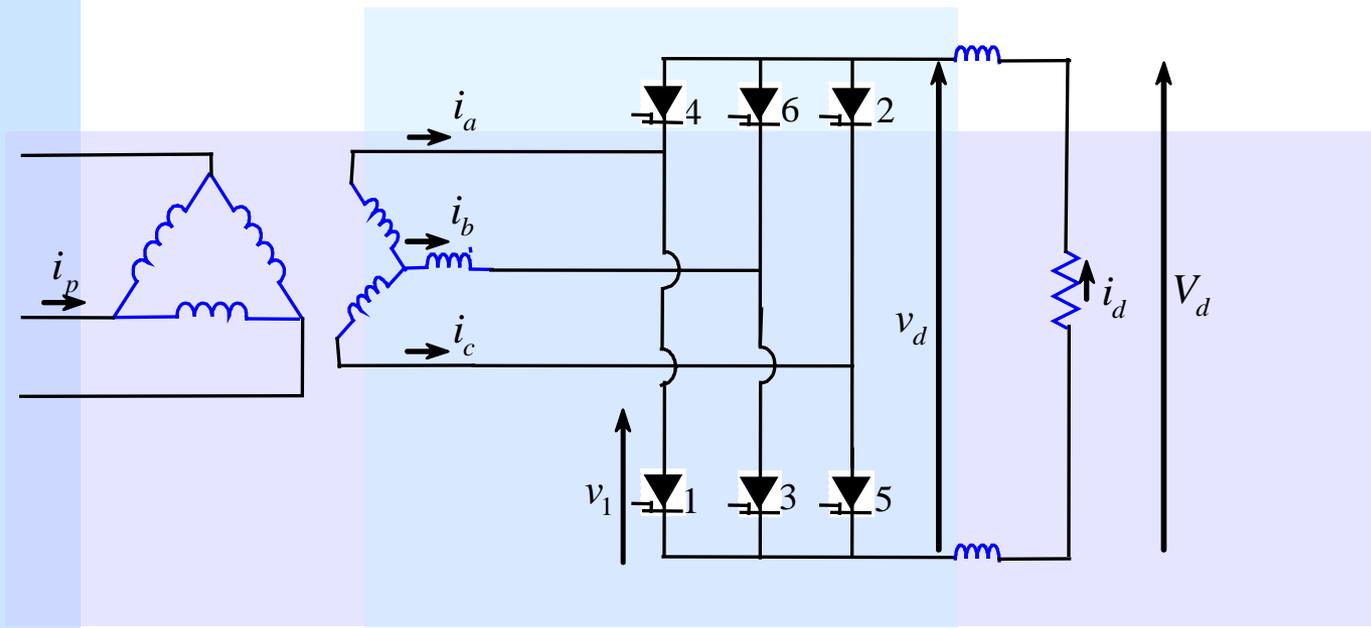


Terminal Receptor



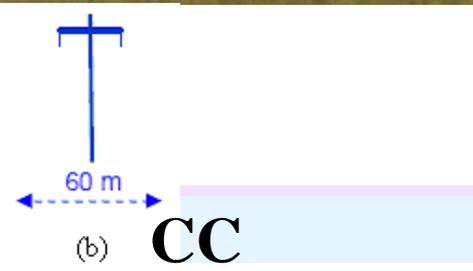
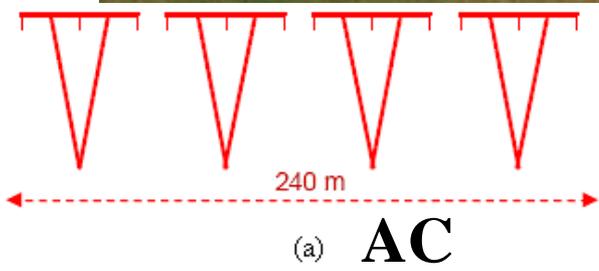
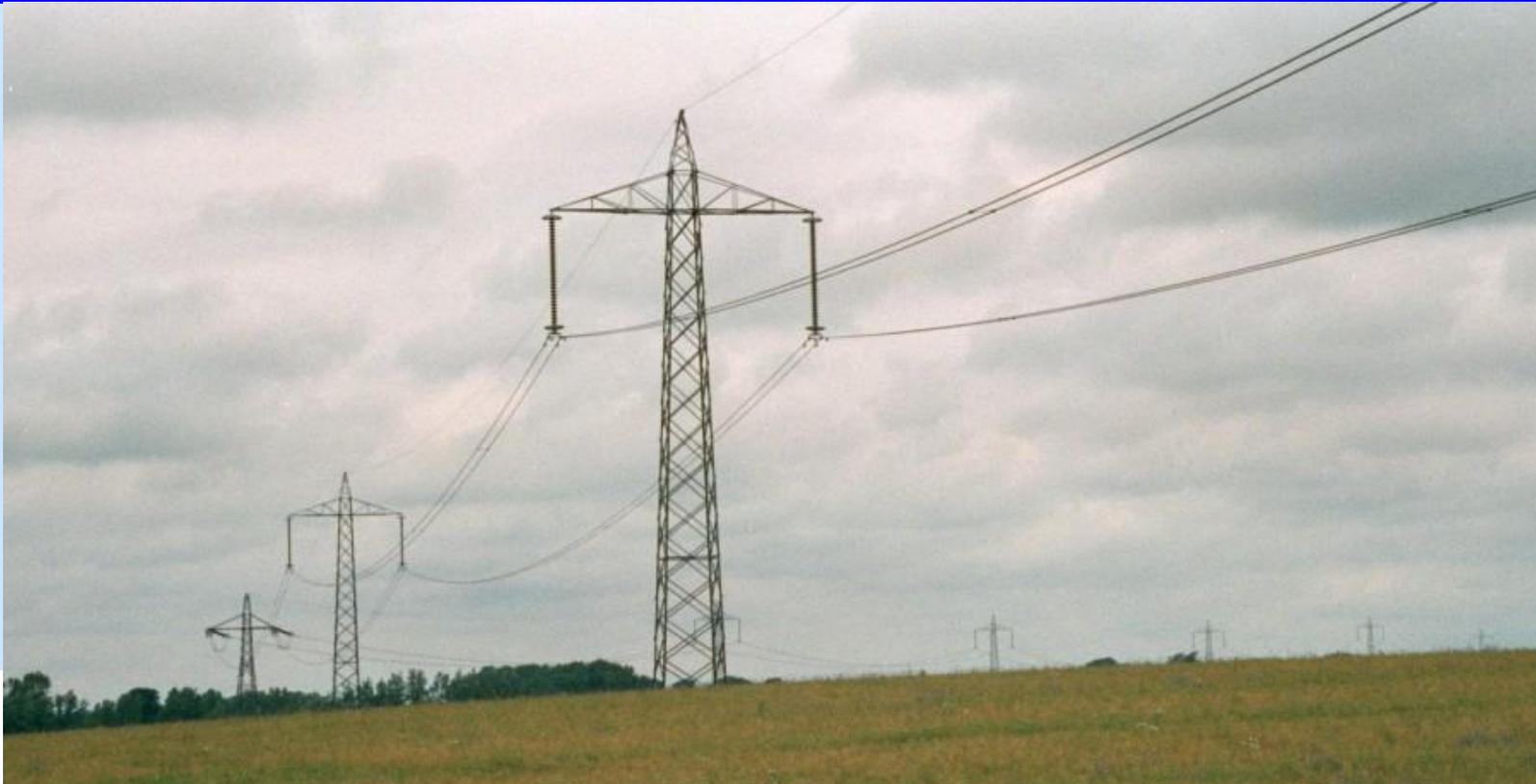








LÍNEA DE TRANSMISIÓN HVDC





BESS (Battery Energy Storage System)

Tecnología de punta. Baterías de litio que pueden entregar energía por un lapso breve (15 minutos)

500kW Power Quality - 100kW Peak Shaving





BESS (Battery Energy Storage System)

Proyecto en Chile. Interconexión en el SING

