



Sistemas HVDC

SESIÓN 4 :

Lecciones aprendidas de experiencias reales en Sistemas HVDC

# Recomendaciones para el desarrollo de proyectos HVDC en mercados eléctricos competitivos



**GABRIEL OLGUIN**

Presidente CIGRE Chile y Reg. Member SC B4 [www.cigre.cl](http://www.cigre.cl)

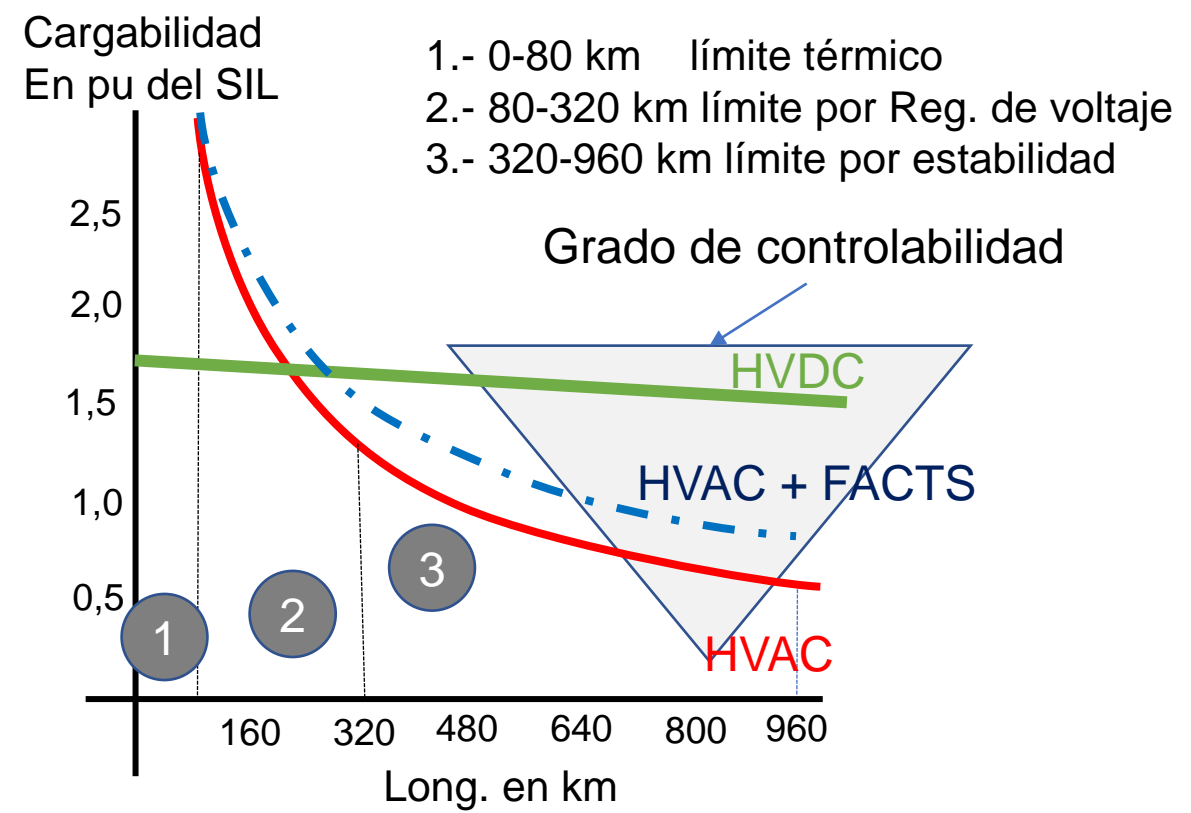
Consultor [www.powerbusiness.cl](http://www.powerbusiness.cl)

# Introducción – HVDC

- Tecnologías de convertidores para HVDC en uso en el mundo
  - Convertidores conmutados por línea HVDC (LCC) basados en tiristores
    - Pros: conocida, competitiva, escalable, bajas pérdidas, apropiada para líneas aéreas
    - Cons: cortocircuito e inercia, falla de conmutación, manejo de potencia reactiva, armónicos, tamaño
  - Convertidores de fuente de tensión (VSC), conmutación forzada, IGBT
    - Pros: aporta potencia reactiva, mínimos armónicos, menor tamaño, facilita multiterminal
    - Cons: tecnología en desarrollo, más cara, mayores pérdidas, desafíos de despeje de falla dc
- Cualquiera sea la tecnología de conversión HVDC, el enlace será parte del SEP y debe satisfacer los **requerimientos del código de red**.
- HVDC No Es una “Línea de Transmisión más”, es un potente controlador, con fuerte impacto en el sistema de energía AC.
- Para entender por qué y cómo HVDC, es necesario entender el sistema de energía eléctrica (HVAC) y en particular sus restricciones de desempeño.

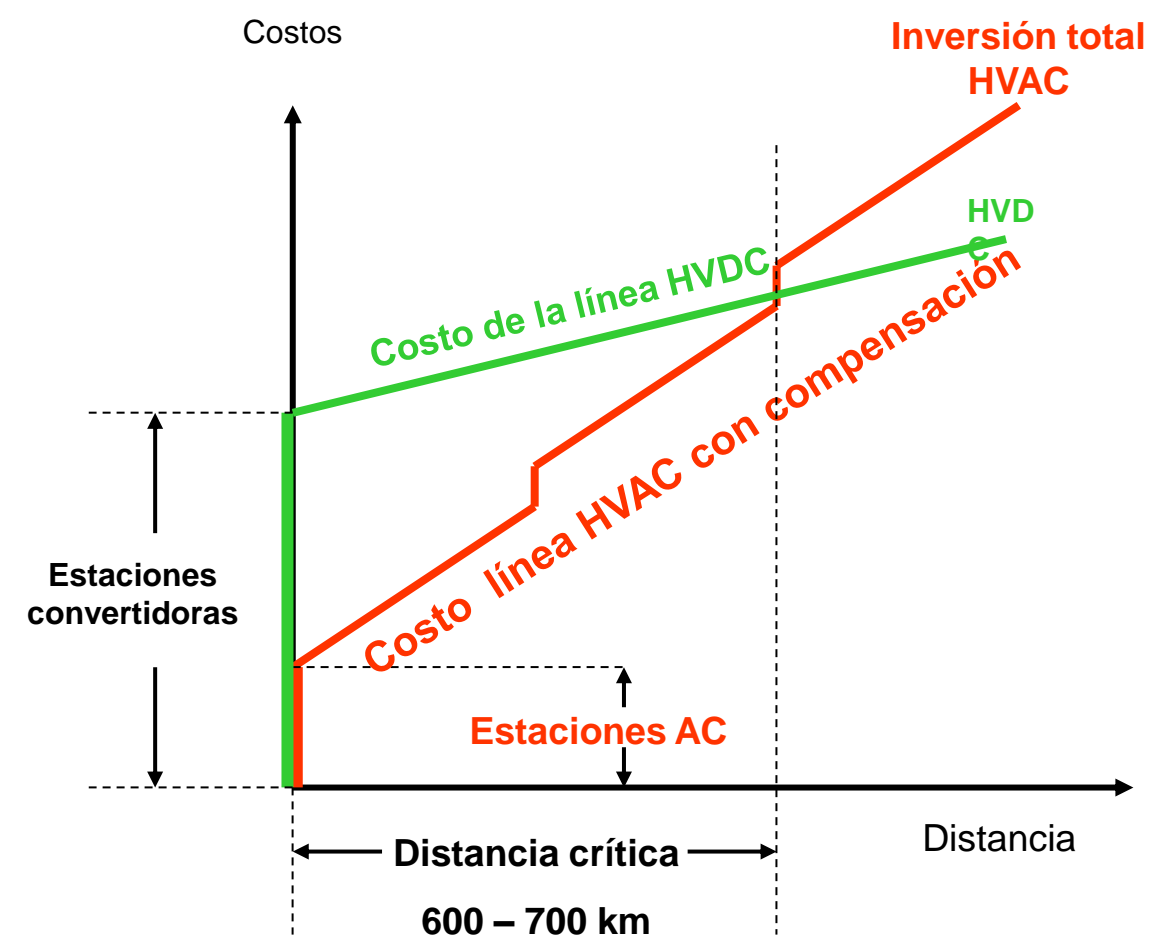


# Cargabilidad de HVAC y HVDC



Ref.: Kundur, Power System Stability and Control

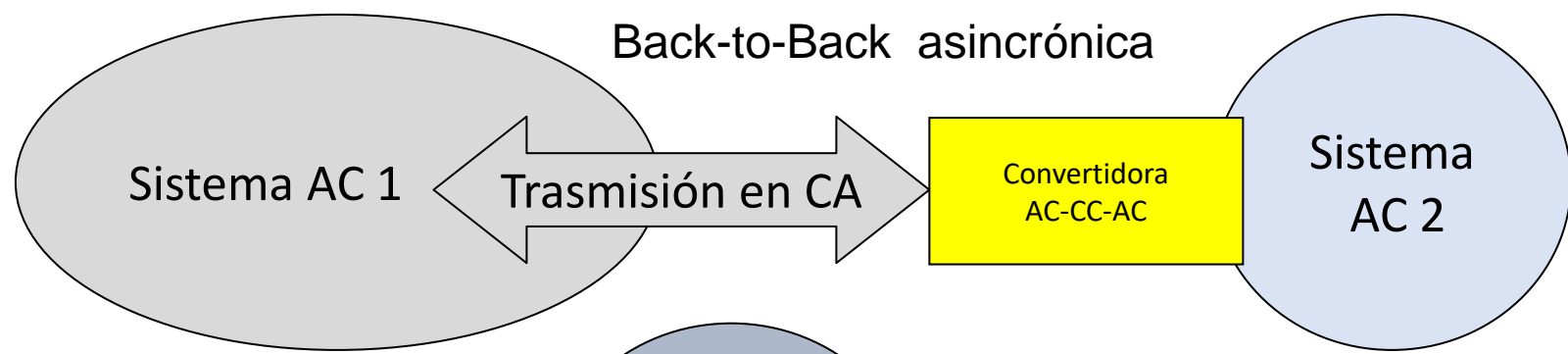
[www.powerbusiness.cl](http://www.powerbusiness.cl)



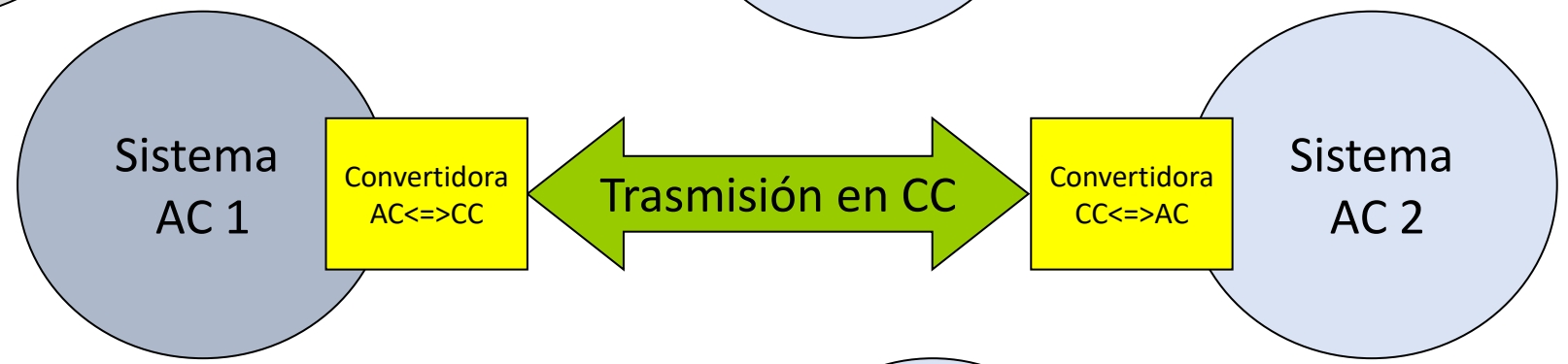


# HVDC Back-to-Back, punto a punto y embebidos

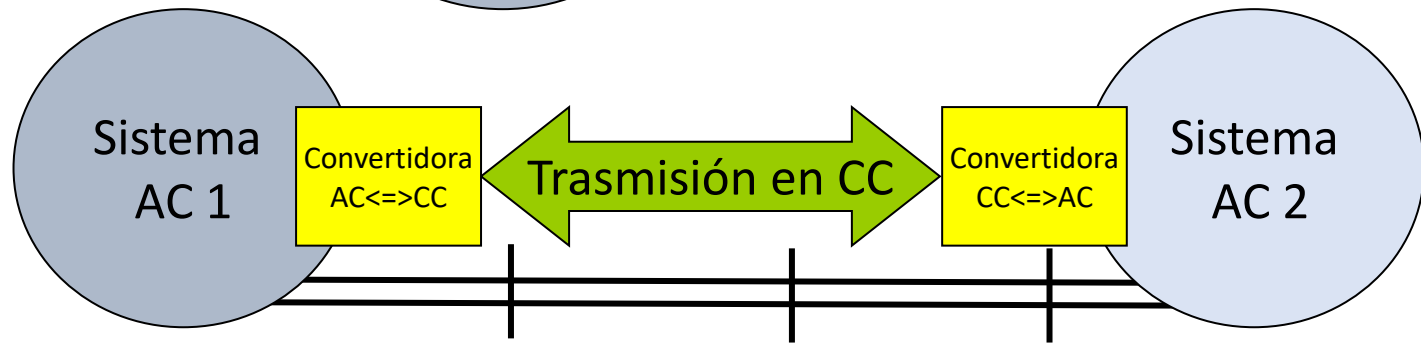
Back-to-Back asincrónica



Transmisión HVDC punto a punto asincrónica



Transmisión HVDC embebida





# Proyecto Hidroeléctrico Aysén – 2750 MW Línea HVDC LCC 2x1350 MW+/-500kV

## Proyecto Hidroeléctrico Aysén

Las cinco centrales que Endesa y Colbún construirán en la Patagonia Chilena.

Inversión estimada construcción de represas: 3.200 millones de dólares

■ Periodo de construcción:  
**11,5 años**

■ Fecha estimada inicio de operaciones:  
**2020**

**A Baker I**  
Potencia: 660 MW  
Superficie embalse 710 hectáreas  
Producción media anual al SIC: 4.420 GWH

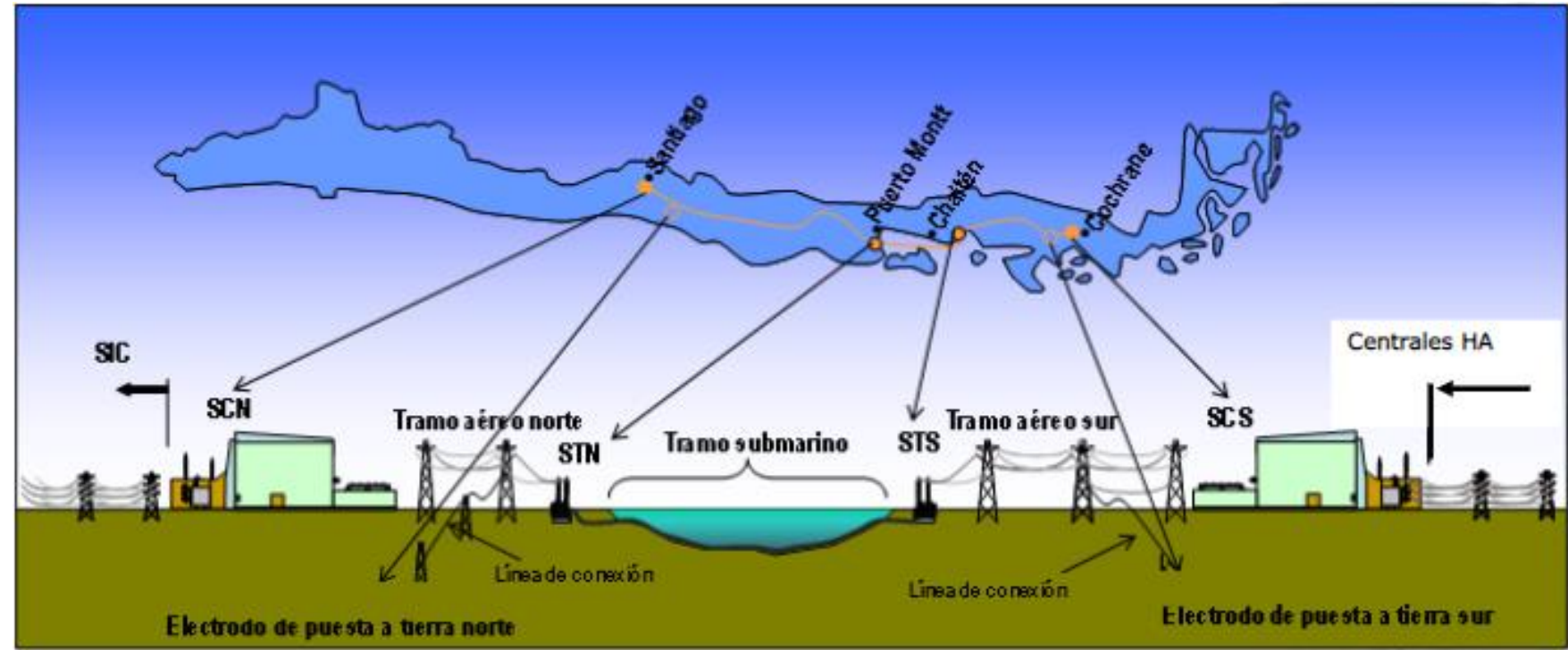
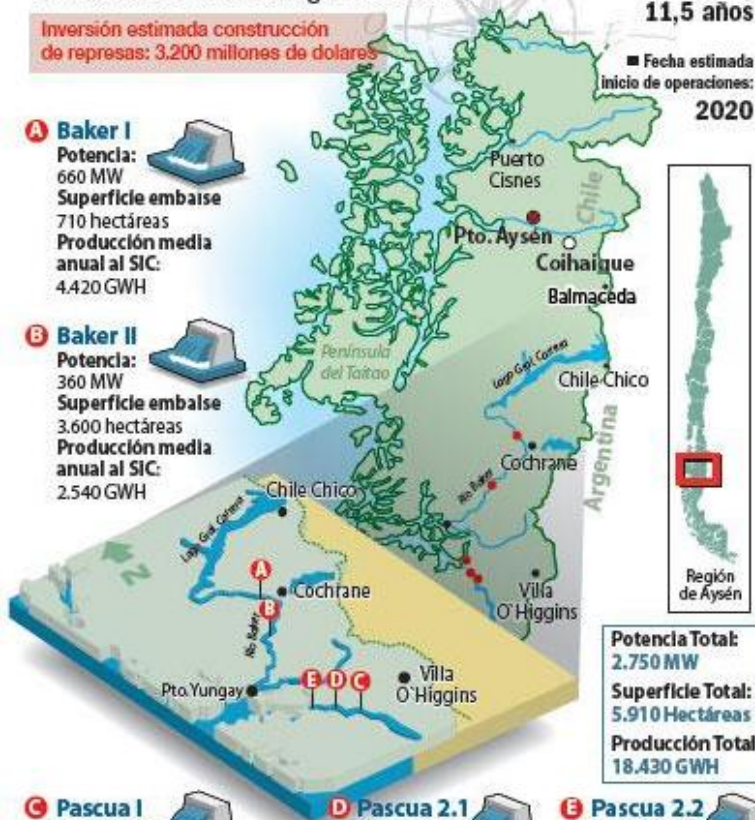
**B Baker II**  
Potencia: 360 MW  
Superficie embalse 3.600 hectáreas  
Producción media anual al SIC: 2.540 GWH

**C Pascua I**  
Potencia: 460 MW  
Superficie embalse 500 hectáreas  
Producción media anual al SIC: 3.020 GWH

**D Pascua 2.1**  
Potencia: 770 MW  
Superficie embalse 990 hectáreas  
Producción media anual al SIC: 5.110 GWH

**E Pascua 2.2**  
Potencia: 500 MW  
Superficie embalse 110 hectáreas  
Producción media anual al SIC: 3.340 GWH

**Potencia Total: 2.750 MW**  
**Superficie Total: 5.910 Hectáreas**  
**Producción Total: 18.430 GWH**

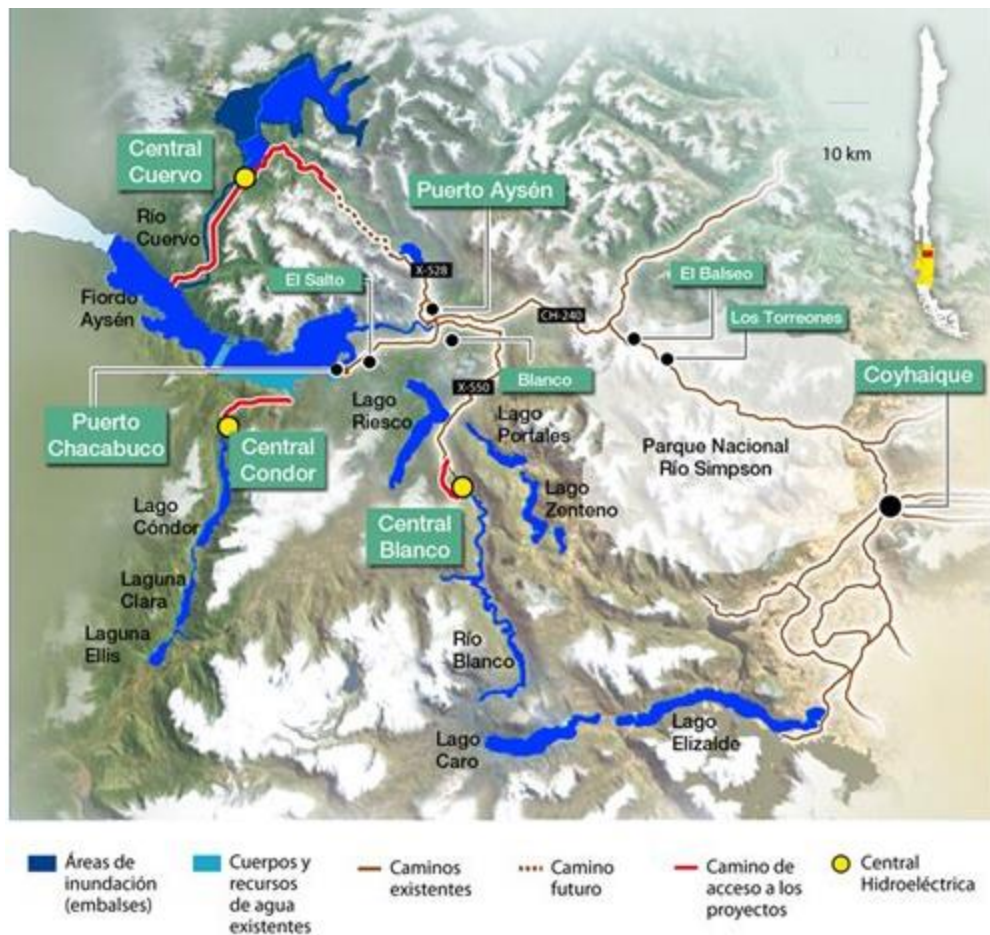


Directorio de Hidroaysén acuerda poner fin al proyecto y devolver derechos de agua

noviembre 17, 2017

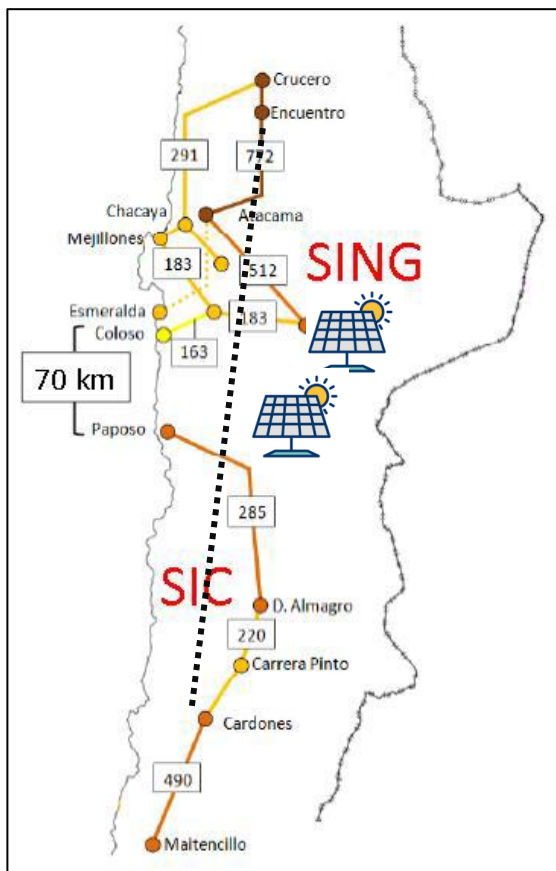
El directorio de Centrales Hidroeléctricas de Aysén, donde Colbún posee el 49% de la propiedad, anunció la liquidación de la sociedad y el desistimiento de los recursos judiciales pendientes.

# Centrales hidroeléctricas Energía Austral ~1200 MW



- Proyecto hidroeléctrico en la región de Aysén. Primera etapa Central Cuervo 640MW
- Línea HVDC +/-500kV bipolar de app 1000 km mixta aérea-submarina.
- Enero 2016 Central Cuervo recibe aprobación ambiental
- Costos de la LT, oposición social y llegada de las renovables.

# Interconexión SIC-SING



- PET 2012-2013 de la autoridad regulatoria recomienda una interconexión en HVDC – Un bipolo en  $\pm 500$  kV, 1.500 MW, Cardones y Nueva Encuentro con línea de **610 km** de estructura bipolar.
- Existía un proyecto de línea AC en desarrollo. Las empresas generadoras “financiaban” parte la Tx.
- Discrepancias ante Panel de Expertos quienes finalmente eliminan la interconexión del PET
- Modificación de Ley para incluir explícitamente interconexiones entre sistemas aislados (Ley 20726)
- Equipo consultor evalúa AC y DC y se opta por 2x500Kv HVAC, entró en servicio el 21 de Nov de 2018

"En caso que las nuevas obras de transmisión contemplen la interconexión de sistemas eléctricos independientes, se deberá realizar y adjuntar al estudio de transmisión troncal una evaluación que dé cuenta de los impactos económicos que tendría, para cada sistema eléctrico por separado, la ejecución y operación de dicha obra."

Ref.: LEY NÚM. 20.726: MODIFICA LA LEY GENERAL DE SERVICIOS ELÉCTRICOS, CON EL FIN DE PROMOVER LA INTERCONEXIÓN DE SISTEMAS ELÉCTRICOS INDEPENDIENTES

# Iniciativas HVDC vigentes en Chile



1. Línea Kimal – Lo Aguirre, 2000MW, 1500km
  2. Línea A. Jahuel – Charrúa, 2000MW, 500km
  3. Línea Encuentro Chile – Montalvo Perú, 2000MW, 600km
  4. BtB Andes/Salta, 600 MW
  5. BtB Parinacota/Tacna, 200 MW
- Transformación de circuito 500kV ac a dc
  - Transformación de circuito 220kV ac a dc



# Pyto HVDC Kimal Lo Aguirre

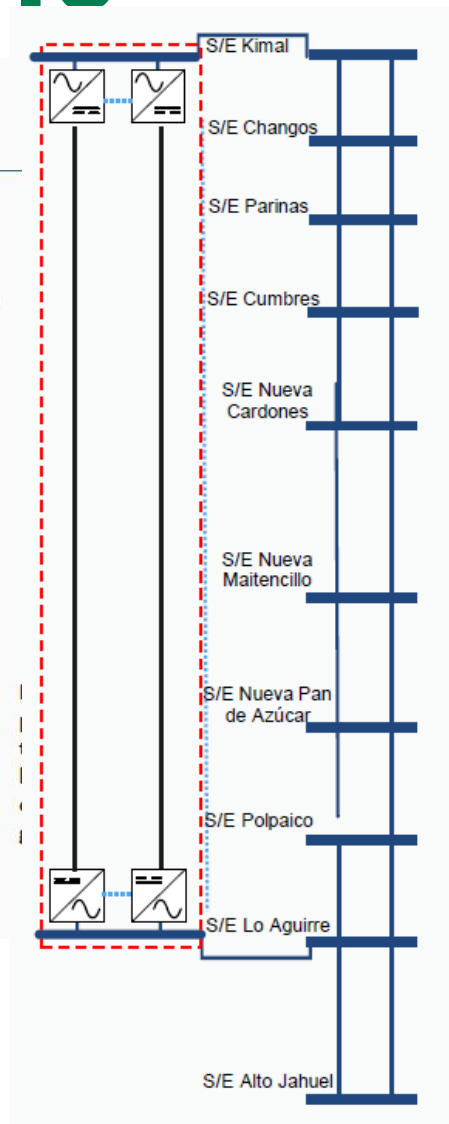
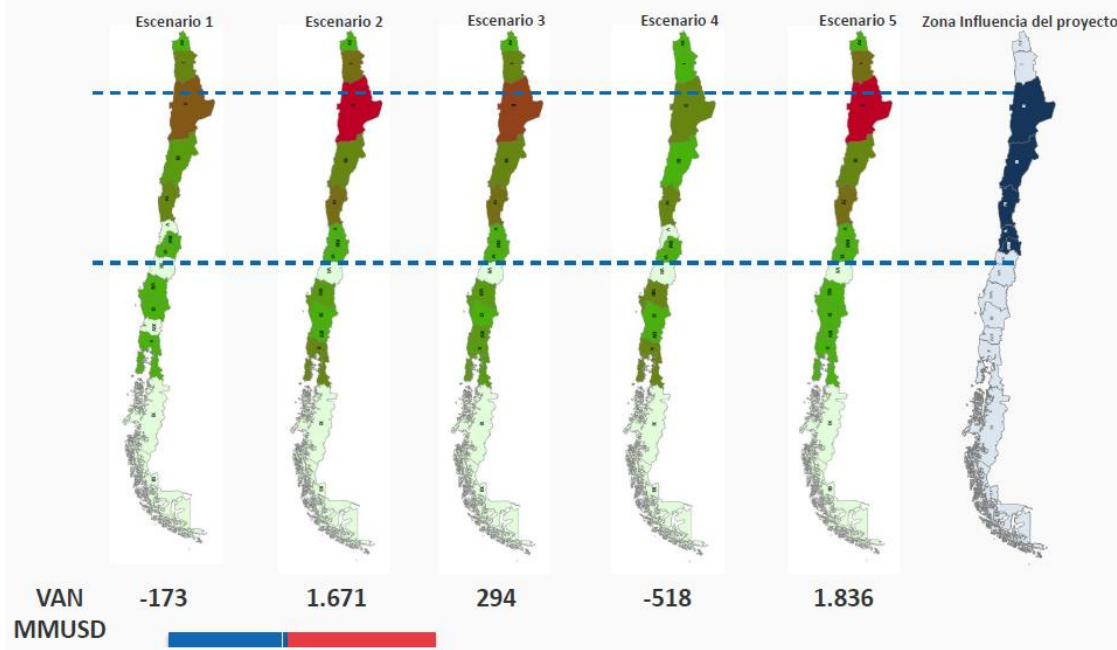
- Bipolo Kimal Lo Aguirre de al menos +/- 600 kVdc,
- Línea de al menos 2.000 MW por polo,
- Retorno metálico
- Distancia: 1.500 km aprox.
- Capacidad convertoras: > 1.000 MW

## Nueva Línea HVDC Kimal – Lo Aguirre

### Proceso de evaluación del proyecto

#### Línea HVDC Kimal – Lo Aguirre

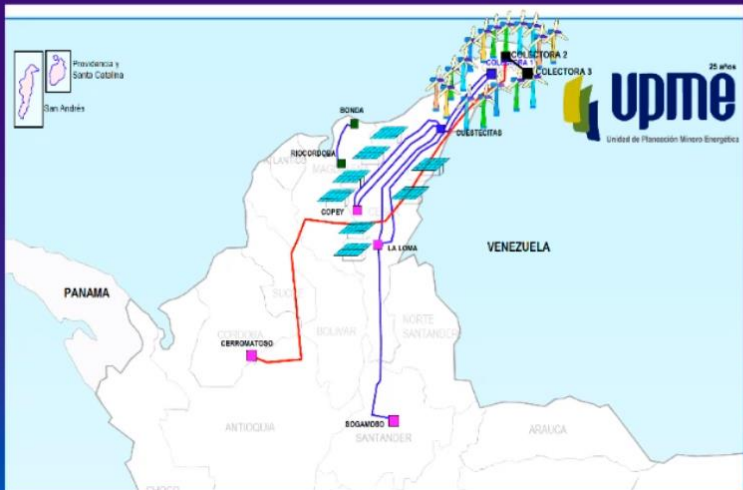
Bipolo +/- 600 kV<sub>DC</sub> (al menos), 2.000 MW por polo, 1.500 km



Ref.: Denison Fuentes, Tutorial HVDC CIGRE Chile 2020

# La Guajira

### Segunda fase renovables - La Guajira



**OPCIÓN HVDC:**

- Línea HVDC a Cerro, 620 km.
- 2 subestaciones colectoras AC, La Guajira.
- 2 estaciones convertidoras AC/DC.
- Capacidad superior a los 2000 MW (Ventaja)
- Según la tecnología es o no es necesario equipos adicionales para corto.

### HVAC vs HVDC

OPCIONES	CAPACIDAD	INFRAESTRUCTURA	VENTAJAS	DESVENTAJAS
<b>Opción 1 AC</b>	Hasta >1200 MW	1 línea 500 kV 2 subestaciones Adicionales corto > 620 km	Red troncal única Menores impactos	Capacidad G limitada
<b>Opción 2 AC</b>	Hasta 2000 MW	4 líneas 500 kV Refuerzos locales > 1540 km		Expansión G limitada Gran extensión de red Implicaciones ambientales, sociales Costo cercano al HVDC
<b>Opción 3 AC</b>	Hasta 2000 MW	2 líneas dobles 500 kV Refuerzos STN y locales > 1260 km		Expansión G limitada Gran extensión de red Implicaciones ambientales, sociales Costo cercano al HVDC
<b>HVDC</b>	> 2000 MW	1 línea 450 kV 2 convertidoras 620 km	Posibilidad de expansión G Red troncal única Menores impactos	Alto costo

**COMPROMETIDO (Cx + LP + Expansión STN):**

- ✓ Total: 2580 MW
- ✓ Eólico: 2072 MW
- ✓ Solar: 508 MW

**REQUERIDO EN EL LP**

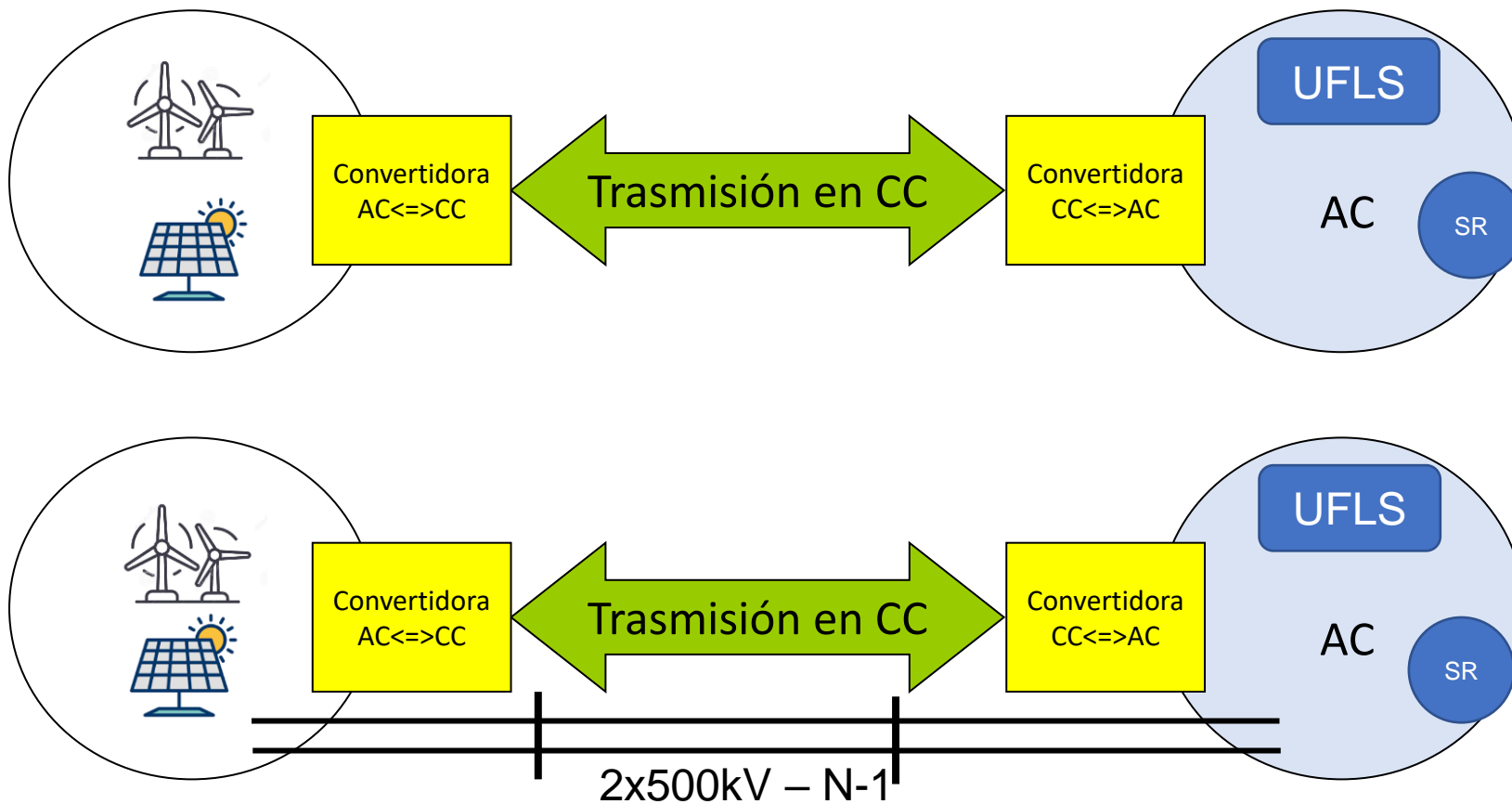
Entre 2000 y 4300 MW adicionales a lo comprometido.

**DISPONIBLE (Conexiones diferentes a lo comprometido)**

- ✓ Total: 5536 MW
- ✓ Eólico: 460 MW
- ✓ Solar: 4703 MW
- ✓ Biomasa: 69 MW
- ✓ Hidro <10MW: 124 MW

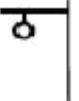
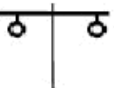
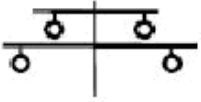
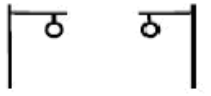
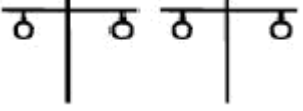
Ref.: presentación Ing. Julián Zuluaga, Conversatorio HVDC CIGRE Colombia 2020

# HVDC punto a punto y embebido – nivel de sobrecarga



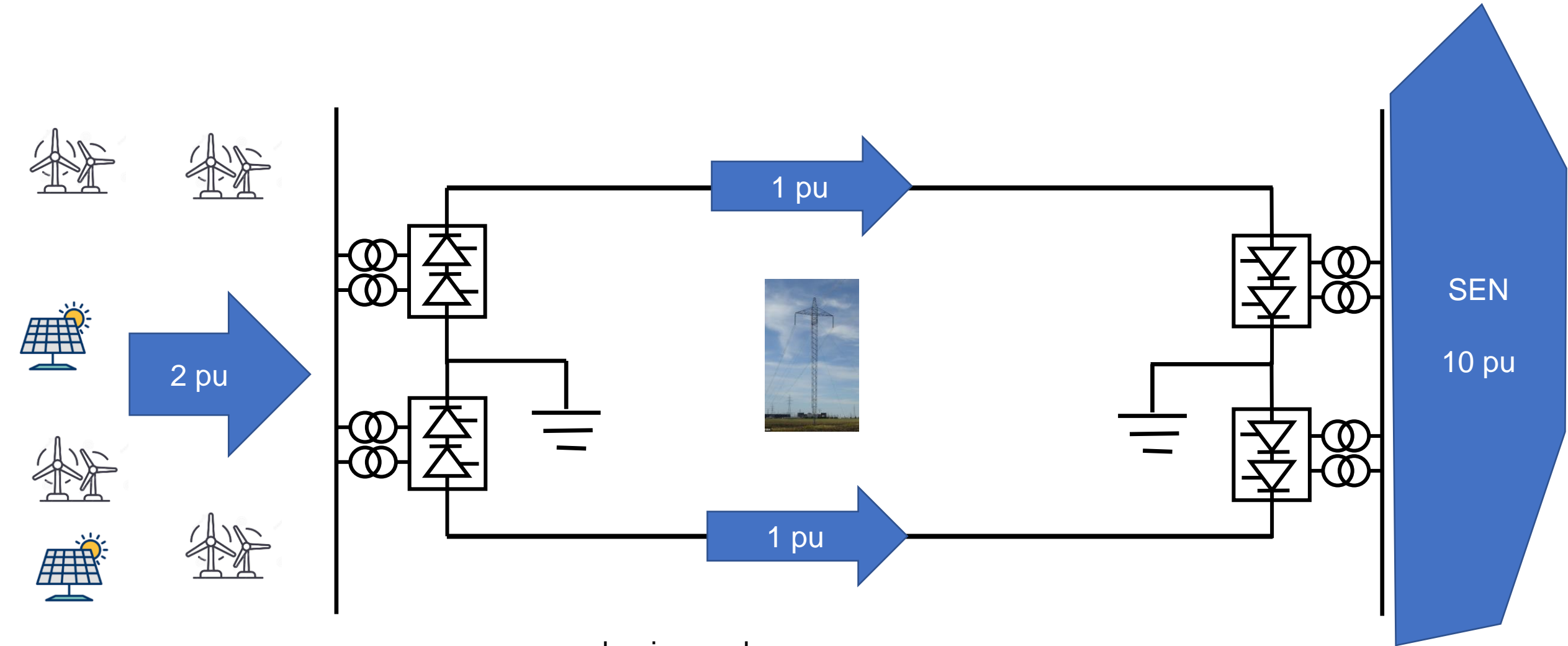
UFLS: Under frequency Load Shedding Scheme  
SR: Spinning reserve

# Fiabilidad y disponibilidad del enlace

Ref.: CIGRE TB 388  Topología 100	Soporte	Capacidad de transmisión disponible post evento		
		Pérdida permanente de una línea-polo		Falla del soporte
		Uso de retorno		
		Permitido o DMR	No permitido y sin DMR	
Monopolo simple		0	0	0
Bipolo simple		50 (100)	0	0
Doble bipolo en soporte común		100	100	0
Dos líneas monopolares		50 (100)	0	50 (100)
Dos líneas bipolares		100	100	100

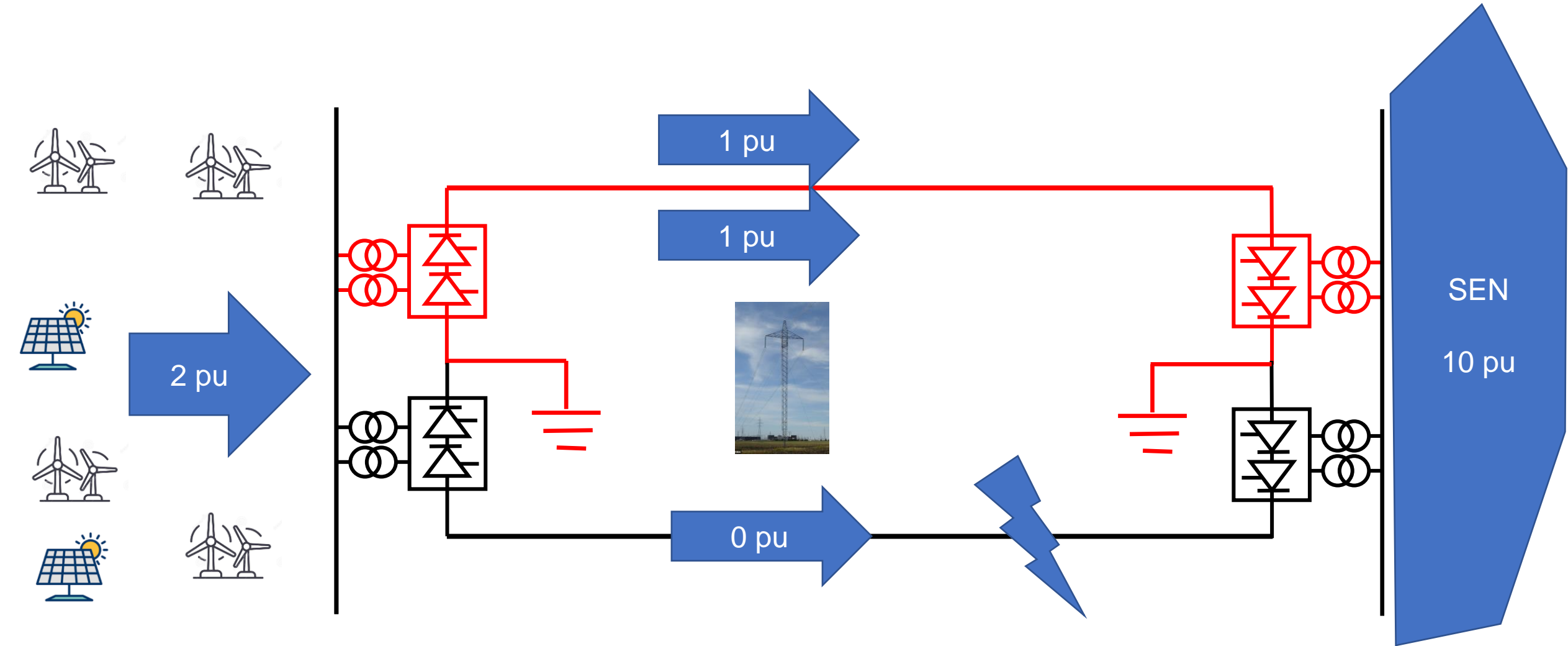
Los valores entre paréntesis asumen que se pueden **paralelizar** convertidores en una línea polar

# Sobrecarga – bipolo simple



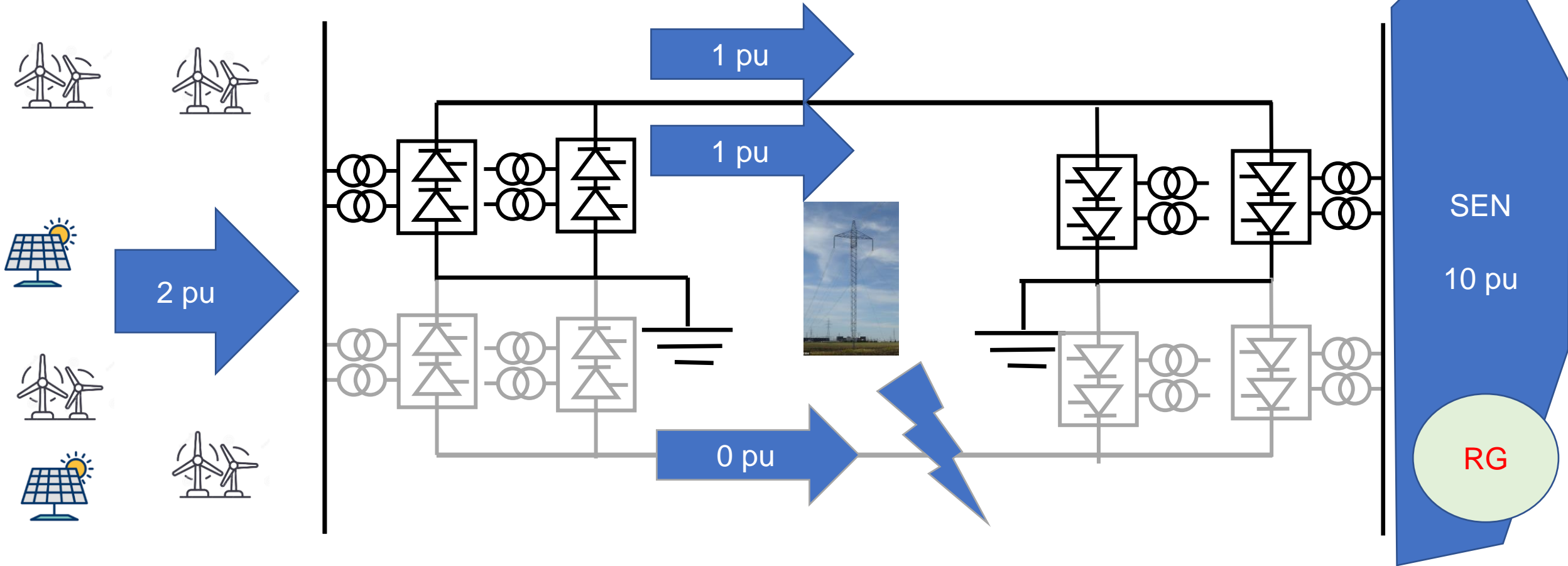
[www.powerbusiness.cl](http://www.powerbusiness.cl)

# Pérdida de un polo - bipolo

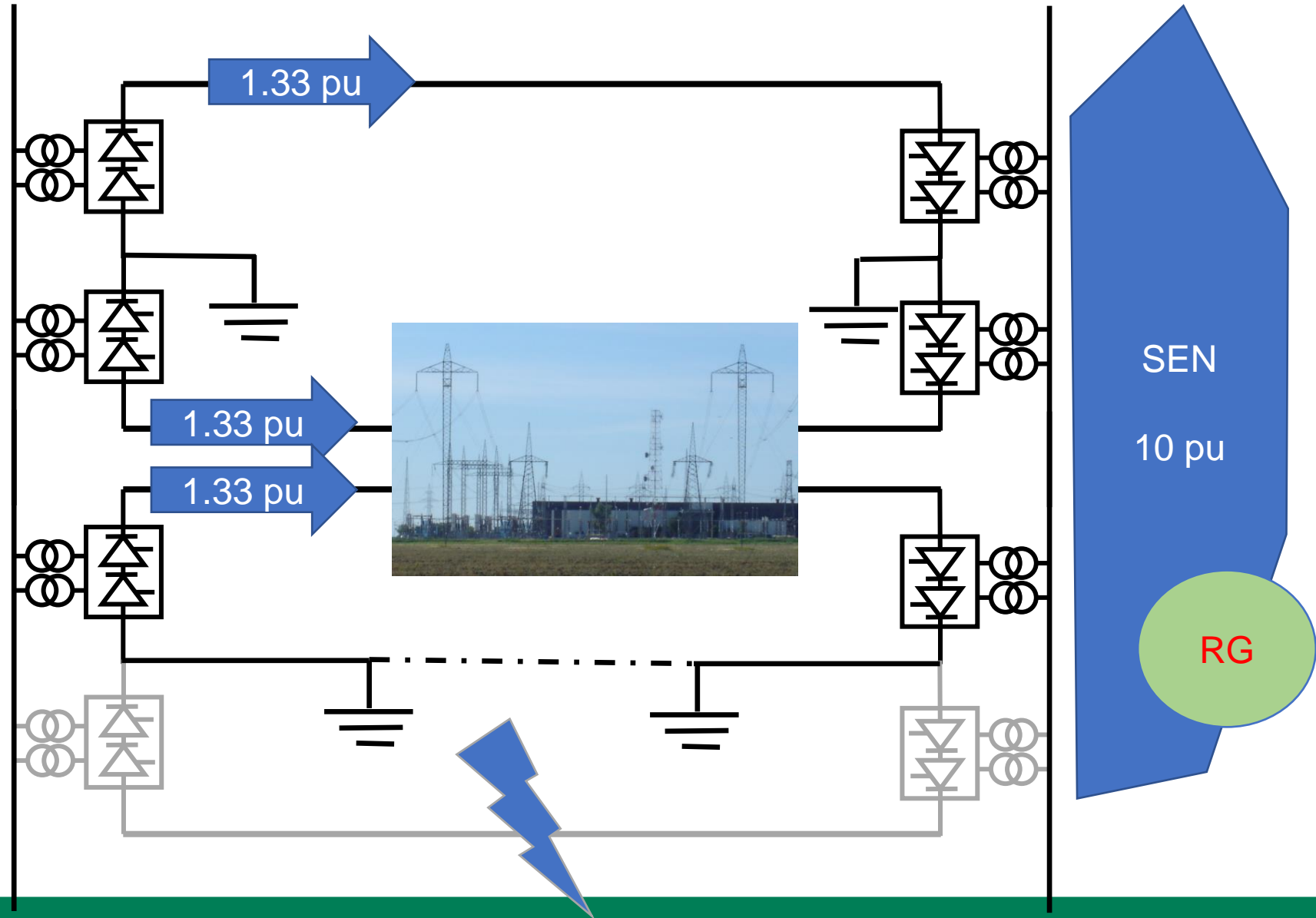
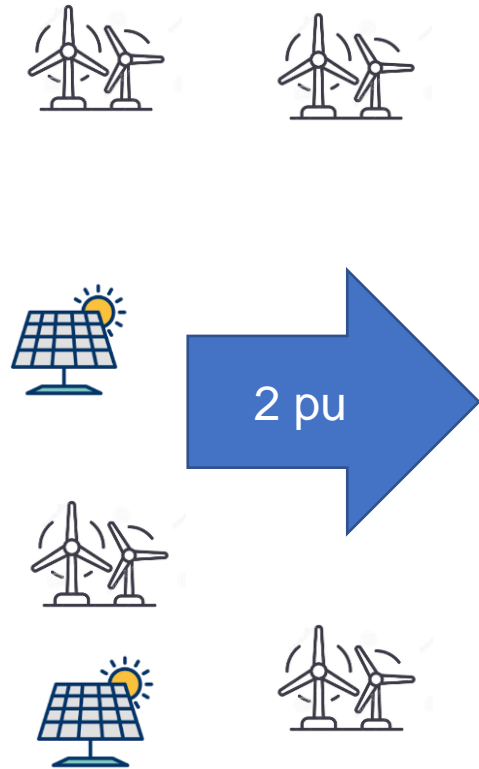


[www.powerbusiness.cl](http://www.powerbusiness.cl)

# Pérdida de un polo – bipolo c/doble convertidor paralelo

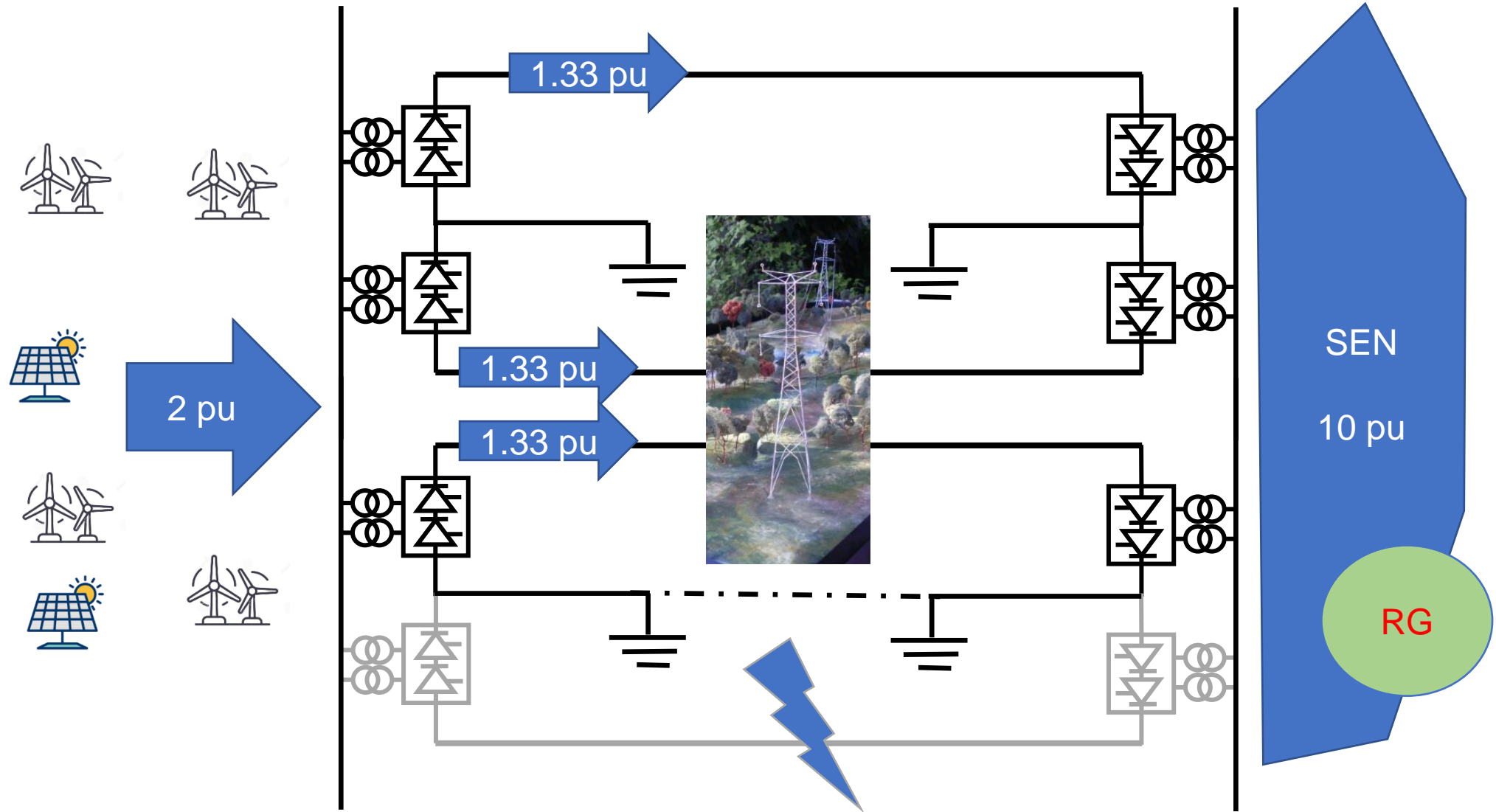


# Pérdida de un polo, doble bipolo

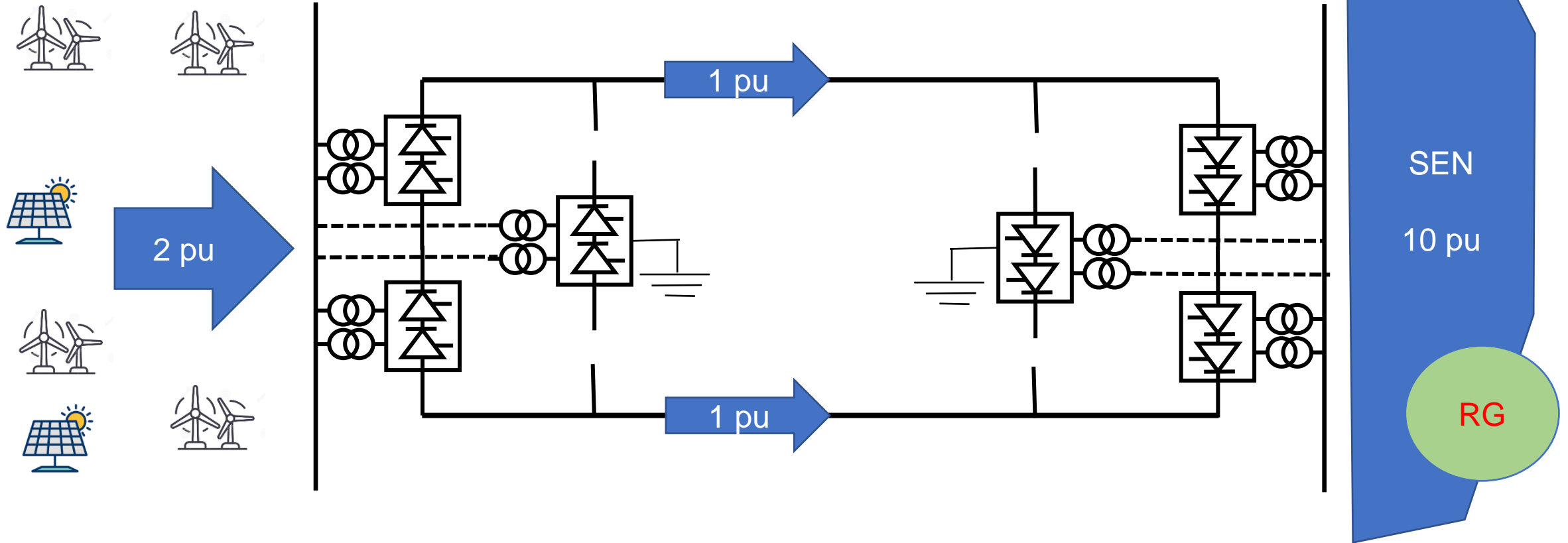




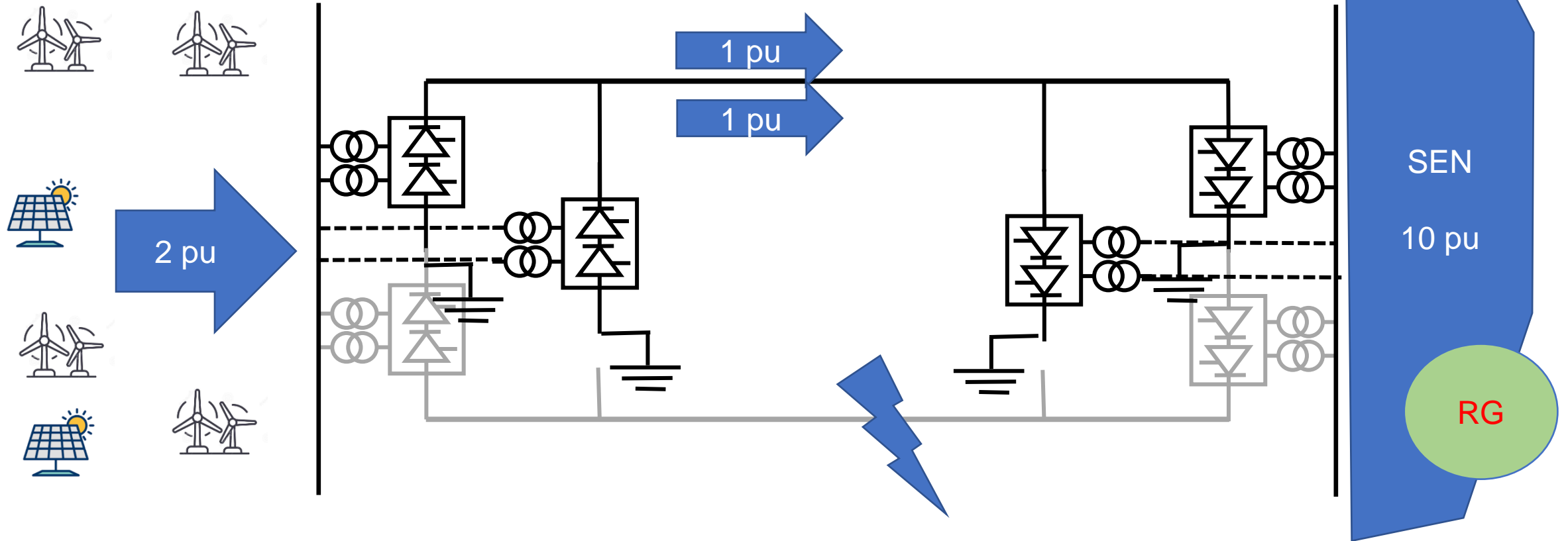
# Pérdida de un polo, doble bipolo en soporte común



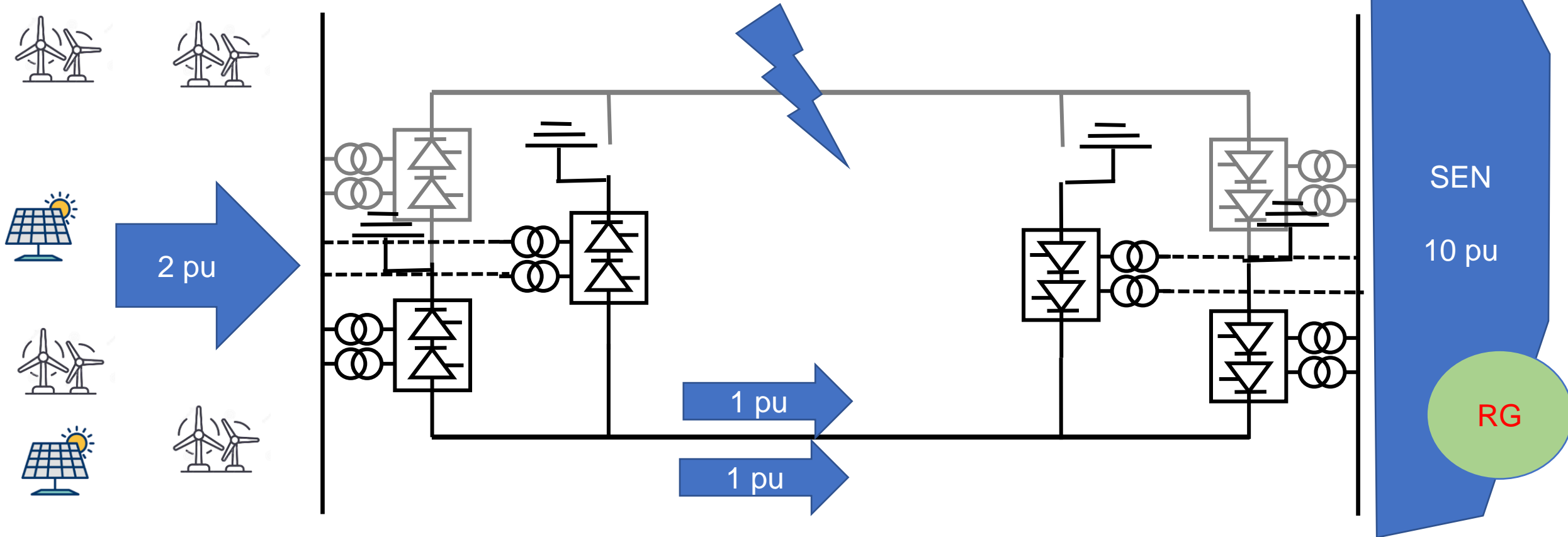
# Pérdida de un polo



# Pérdida de un polo



# Pérdida de un polo



# CONVERSATORIO : Sistemas HVDC



Empresas de transmisión, consultores  
 HVDC Vendors, proponentes  
 Estudios RMS y EMT  
 Especificaciones técnicas

HVDC Vendors  
 Diseño de control  
 Diseño protecciones  
 Desempeño dinámico

HVDC Vendors, SO, TO  
 Pruebas de comisionamiento  
 Desempeño de convertidores  
 Desempeño sistémico  
 Cumplimiento esp. Técnicas

HVDC Vendors, SO, TO  
 Nuevas funciones  
 Software upgrade  
 Replica de control



Ob.: especificar proyecto



Emp. Transmisora,  
 desarrollador, propietarios,  
 regulador, operador  
 Estudios en el dominio  
 fador (RMS) y económicos

Propietarios, HVDC Vendors,  
 consultores  
 Estudios RMS y ETM  
 Estab. Transitoria, TOV, TRV,  
 diseño de equipos

HVDC Vendors  
 Verificación de C&P  
 Desempeño dinámico con  
 controlador real  
 Coordinación de protecciones  
 con control real

HVDC Vendors, SO,  
 TO  
 Investigación de  
 incidentes, fallas

Vendors, SO, TO  
 Reemplazo de C&P  
 Reemp. de válvulas  
 Replica



Ref.: Basado en "Webinar on Apr. 16th | Practical Use of Real Time Simulation for De-risking HVDC Integration" HVDC Centre UK

## Comentarios finales

- HVDC LCC parece ser la opción para transmisión masiva de potencia con línea aérea porque tiene mejor capacidad para despejar fallas DC.
- HVDC VSC si bien provee mejores prestaciones sistémicas, su uso con línea aérea requiere del desarrollo de soluciones para despeje rápido de fallas en el lado DC. Actualmente se trabaja en los conceptos de HVDC VSC FB, HVDC HB+FB y HVDC híbrido LCC+VSC.
- Cualquiera sea la tecnología seleccionada, la integración segura en el sistema de potencia requiere de múltiples estudios eléctricos que confirmen cumplimiento del código de red.

# Recomendaciones

- Hacer suficiente ingeniería conceptual para explorar diversas opciones de estructura del circuito principal HVDC y troncal del SIN (suficiencia ante la incertidumbre) para satisfacer a las diversas partes interesadas
- Preparar los requisitos de desempeño del enlace HVDC conforme la estructura optima del enlace y a la vista del código de red actual, nuevas tecnologías de generación y modificaciones necesarias
- Hacer estudios sistémicos estáticos y dinámicos (RMS y EMT) para validar las alternativas de control – HVDC es un controlador del SEP

## Conclusiones

- HVDC es un tecnología madura y al mismo tiempo en continuo desarrollo. Existen dos principios básicos que dan origen a dos implementaciones comerciales de HVDC; estas son HVDC LCC y HVDC VCS. HVDC LCC es especialmente aplicable a transmisión masiva de potencia eléctrica, alcanzando hoy valores de 12 GW en un bipolo de +/-1100kV. HVDC VSC es una tecnología más reciente y aún en desarrollo. HVDC VSC es particularmente atractiva para integración de energía renovable variable, con cable aislado, por su capacidad de control independiente de potencia activa y reactiva.
- La selección de la tecnología más adecuada para una aplicación en particular requiere de estudios técnico económicos que permitan comparar el desempeño, inversión y costo de operación de cada opción tecnológica.



# Gracias

**Gabriel Olguín** [www.powerbusiness.cl](http://www.powerbusiness.cl)

