

Análisis de oscilaciones en sistemas de conversión de energía eólica

Plan de trabajo de tesis doctoral de Nicolás Costa

Doctorado en Ingeniería
Departamento de Ingeniería Eléctrica y de Computadoras
Universidad Nacional del Sur



Directores: Dr. Diego M. Alonso (UNS)
Dr. Roberto D. Fernández (UNPSJB)

Colaboración: Dr. Gustavo Revel (UNS)



Introducción

Análisis de oscilaciones en sistemas de conversión de energía eólica

Sistemas de potencia  Sincronismo 50Hz

Introducción

Análisis de oscilaciones en sistemas de conversión de energía eólica

Sistemas de potencia \longrightarrow Sincronismo 50Hz

Oscilaciones de frecuencia diferente a la del sincronismo

Interacciones Subsincrónicas \longrightarrow Oscilaciones de frecuencia menor a 50Hz

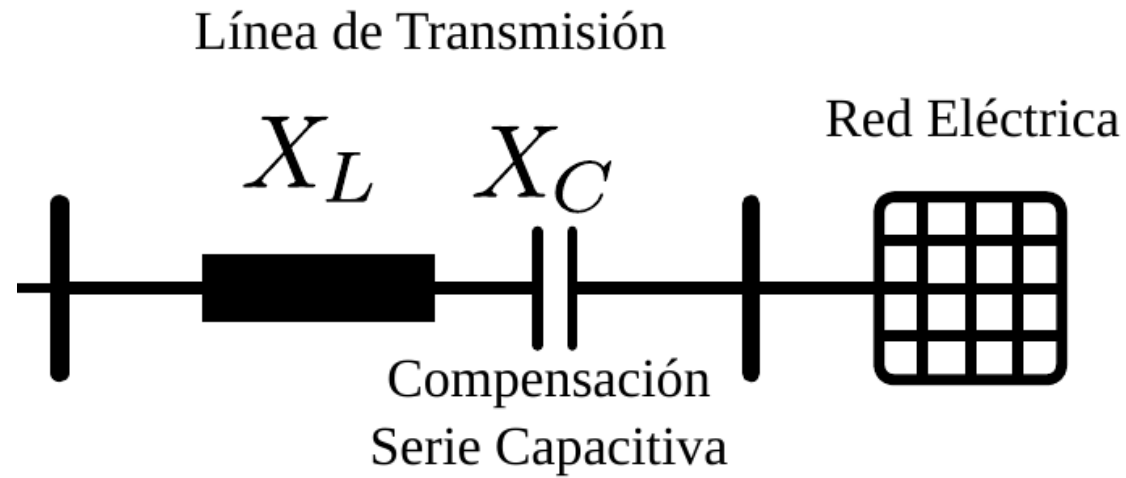
Introducción

Análisis de oscilaciones en sistemas de conversión de energía eólica

Sistemas de potencia \longrightarrow Sincronismo 50Hz

Oscilaciones de frecuencia diferente a la del sincronismo

Interacciones Subsincrónicas \longrightarrow Oscilaciones de frecuencia menor a 50Hz



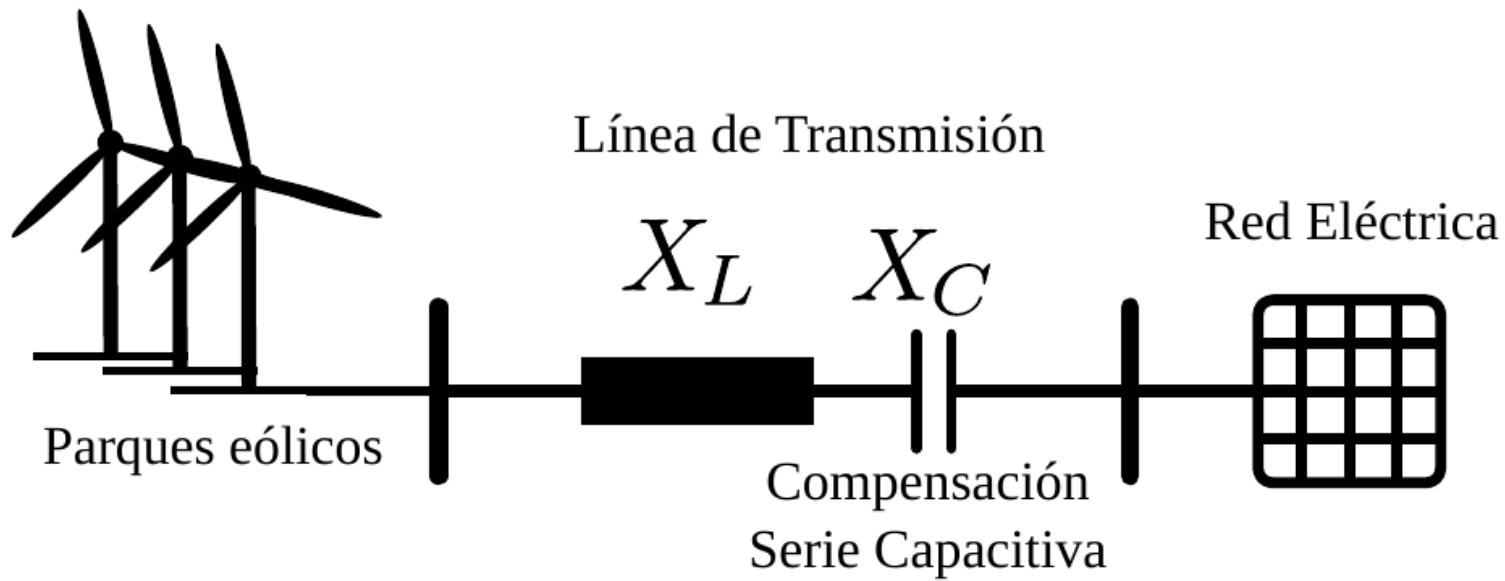
Introducción

Análisis de oscilaciones en sistemas de conversión de energía eólica

Sistemas de potencia \longrightarrow Sincronismo 50Hz

Oscilaciones de frecuencia diferente a la del sincronismo

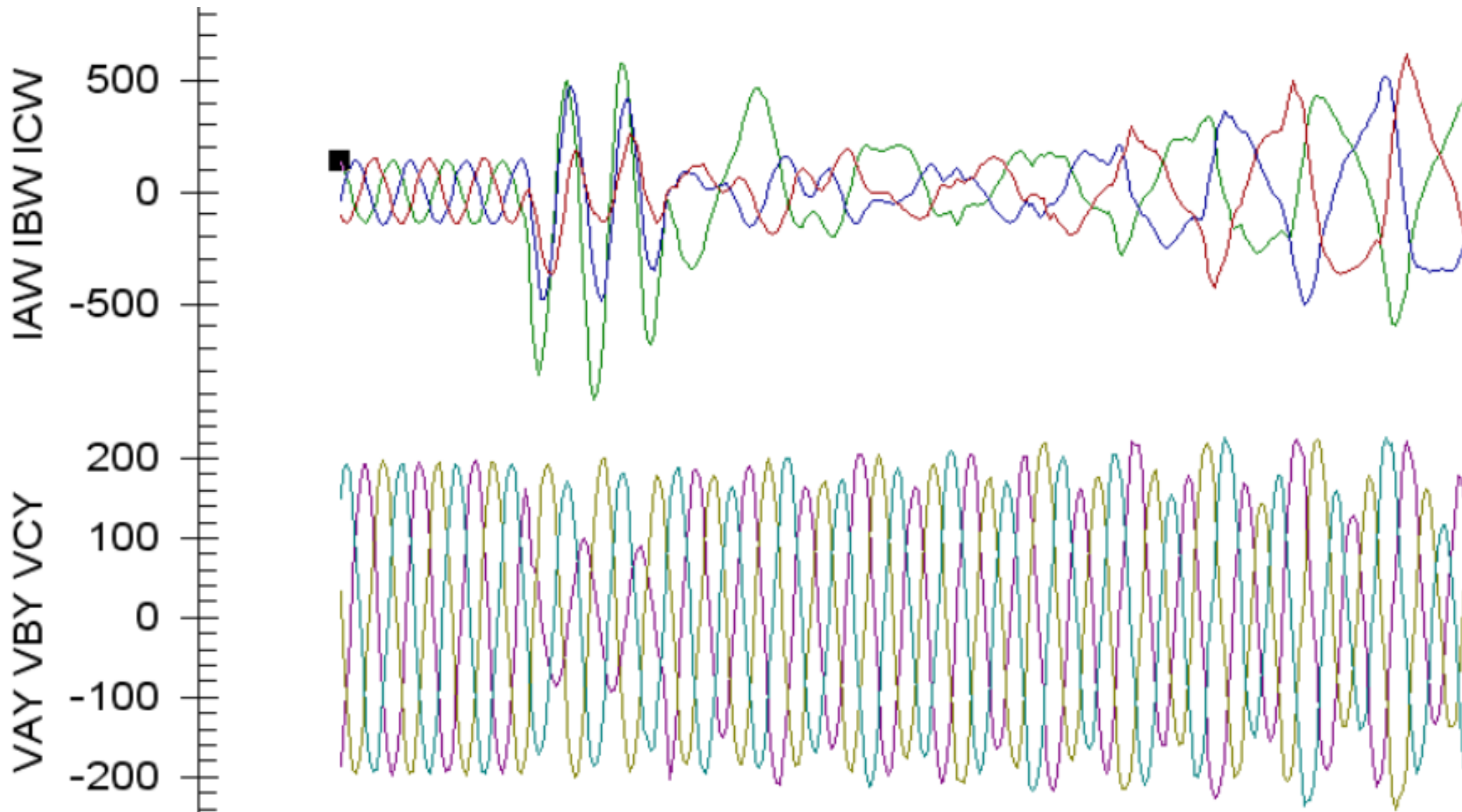
Interacciones Subsincrónicas \longrightarrow Oscilaciones de frecuencia menor a 50Hz



Interacción Subsincrónica de Control (SSCI)

Interacción Subsincrónica de Control (SSCI)

Registro de datos SSCI en Texas (2009)



Interacción Subsincrónica de Control (SSCI)

Estudio de SSCI por análisis de autovalores

Dado un **sistema lineal** $\dot{x} = Ax$

Estable \longrightarrow autovalores de A tienen **parte real negativa**

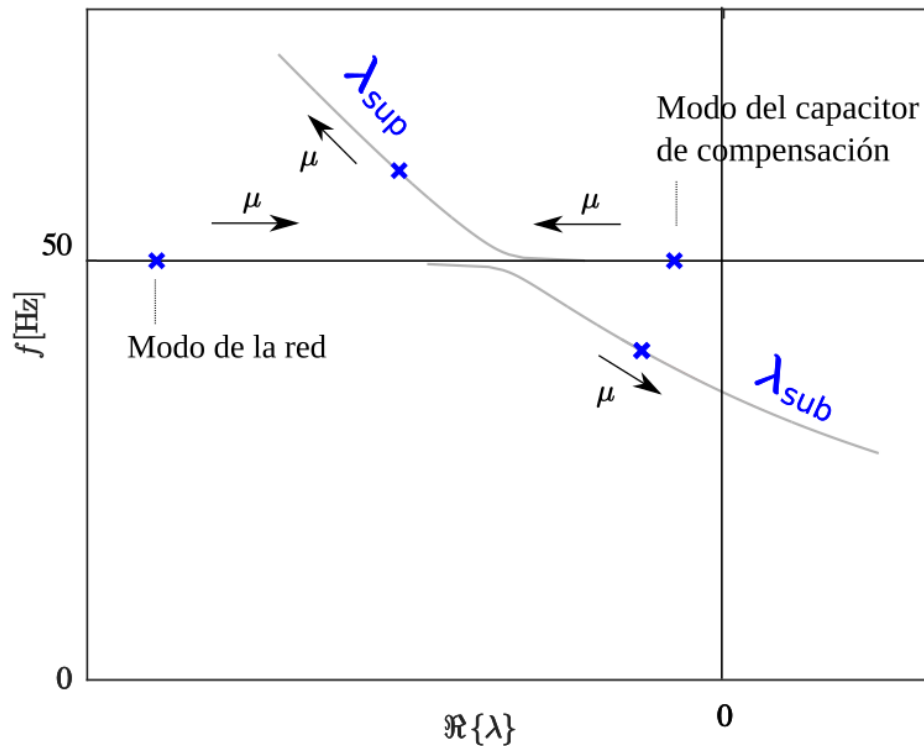
Interacción Subsincrónica de Control (SSCI)

Estudio de SSCI por análisis de autovalores

Dado un **sistema lineal** $\dot{x} = Ax$

Estable \longrightarrow autovalores de A tienen **parte real negativa**

Una **compensación serie** introduce **4 autovalores**:



1 par **complejo conjugado**
de frecuencia > **50 Hz** λ_{sup}

1 par **complejo conjugado**
de frecuencia < **50 Hz** λ_{sub}

Nivel de compensación

$$\mu = \frac{X_C}{X_L} \quad 0 < \mu < 1$$

Interacción Subsíncrona de Control (SSCI)

Estudio de SSCI por análisis de autovalores

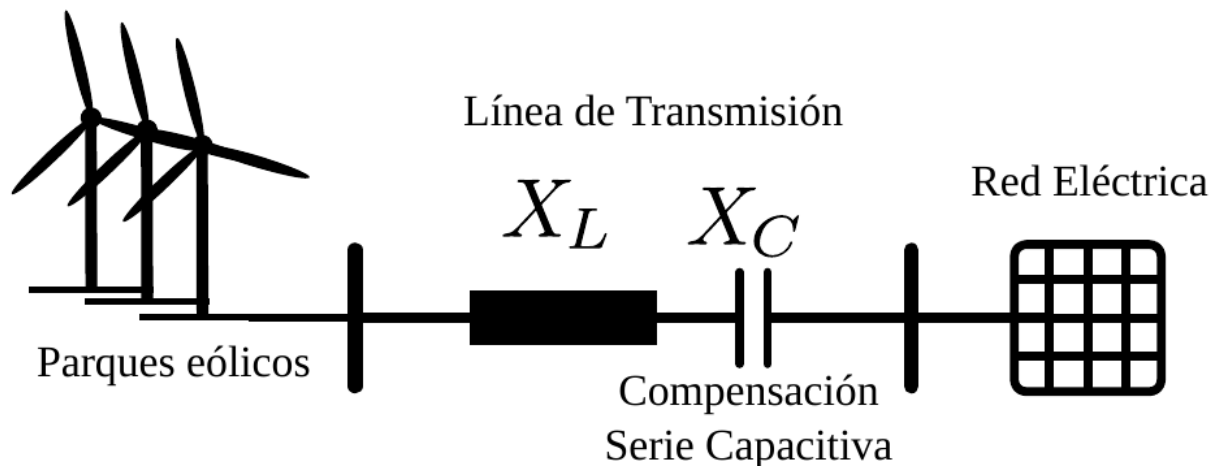
Modelado matemático

Ecuaciones diferenciales

$$\dot{x} = f(x, \mu) \rightarrow \text{No lineal}$$

→ x variables

→ μ parámetros



Nivel de compensación

$$\mu = \frac{X_C}{X_L} \quad 0 < \mu < 1$$

Interacción Subsincrónica de Control (SSCI)

Estudio de SSCI por análisis de autovalores

Modelado matemático

Ecuaciones diferenciales

$$\dot{x} = f(x, \mu) \rightarrow \text{No lineal}$$

$\rightarrow x$ variables

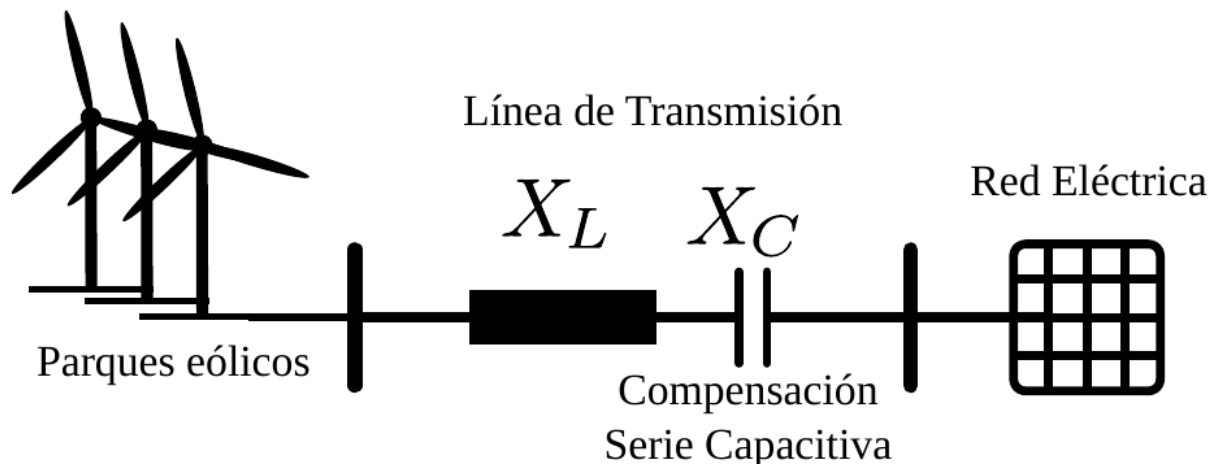
$\rightarrow \mu$ parámetros

Linealización del sistema

$$\dot{x} = A(\bar{x}, \bar{\mu})x$$

$$A(\bar{x}, \bar{\mu}) = \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{(\bar{x}, \bar{\mu})}$$

Autovalores de $A(\bar{x}, \bar{\mu})$



Nivel de compensación

$$\mu = \frac{X_C}{X_L} \quad 0 < \mu < 1$$

Interacción Subsincrónica de Control (SSCI)

Estudio de SSCI por análisis de autovalores

Modelado matemático

Ecuaciones diferenciales

$$\dot{x} = f(x, \mu) \rightarrow \text{No lineal}$$

→ x variables

→ μ parámetros

Linealización del sistema

$$\dot{x} = A(\bar{x}, \bar{\mu})x$$

$$A(\bar{x}, \bar{\mu}) = \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{(\bar{x}, \bar{\mu})}$$

Autovalores de $A(\bar{x}, \bar{\mu})$

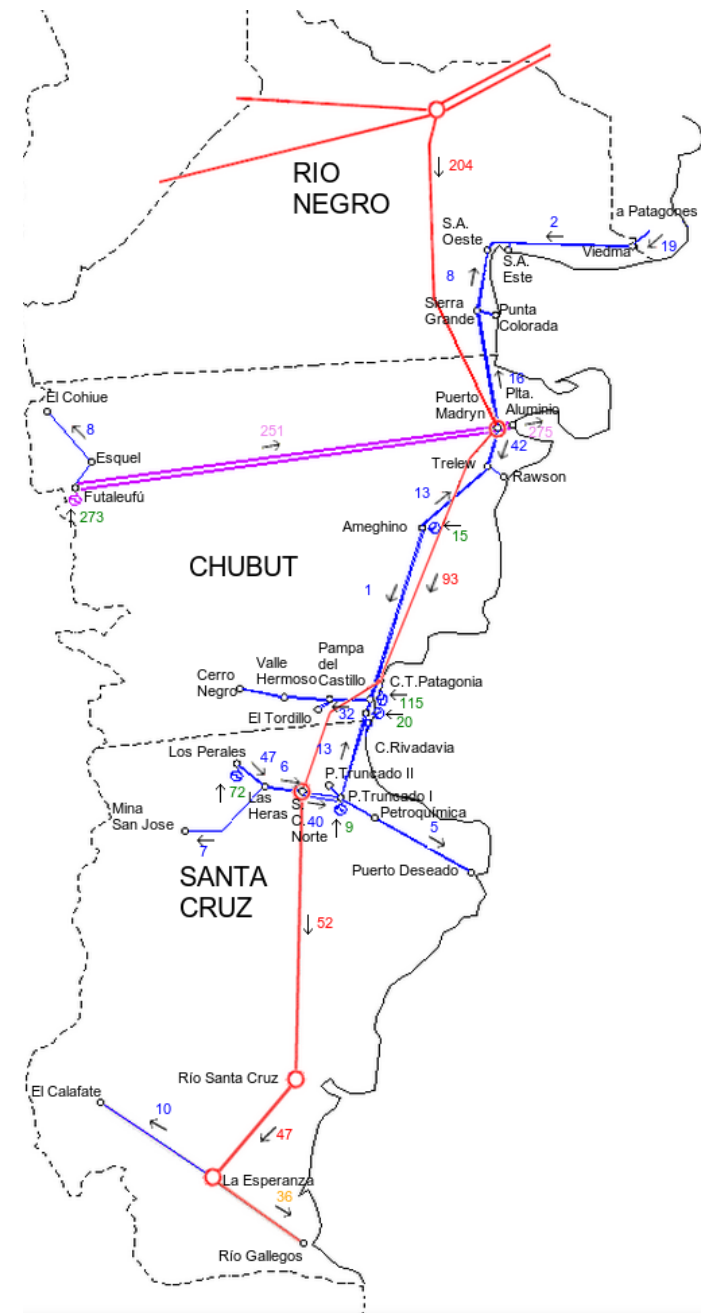
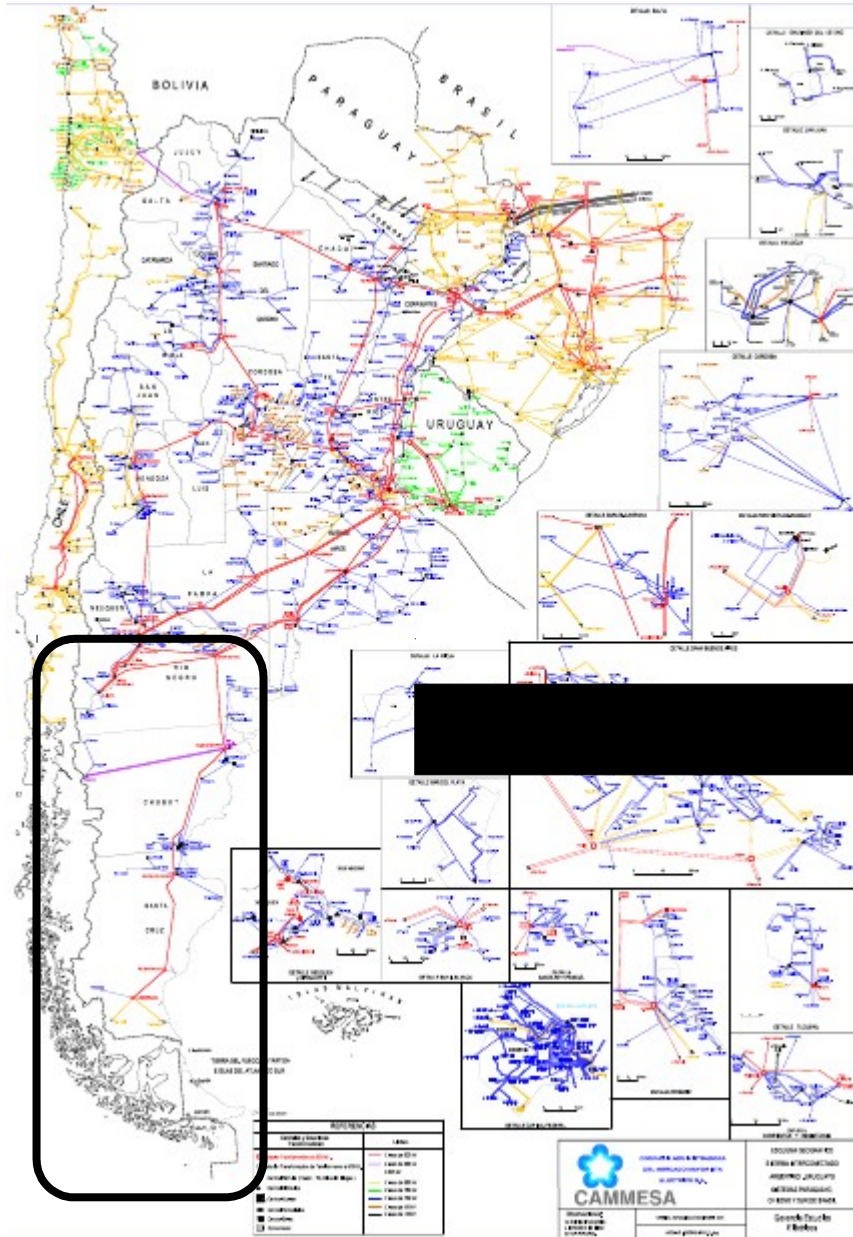


Análisis selectivo de Modos (SMA)

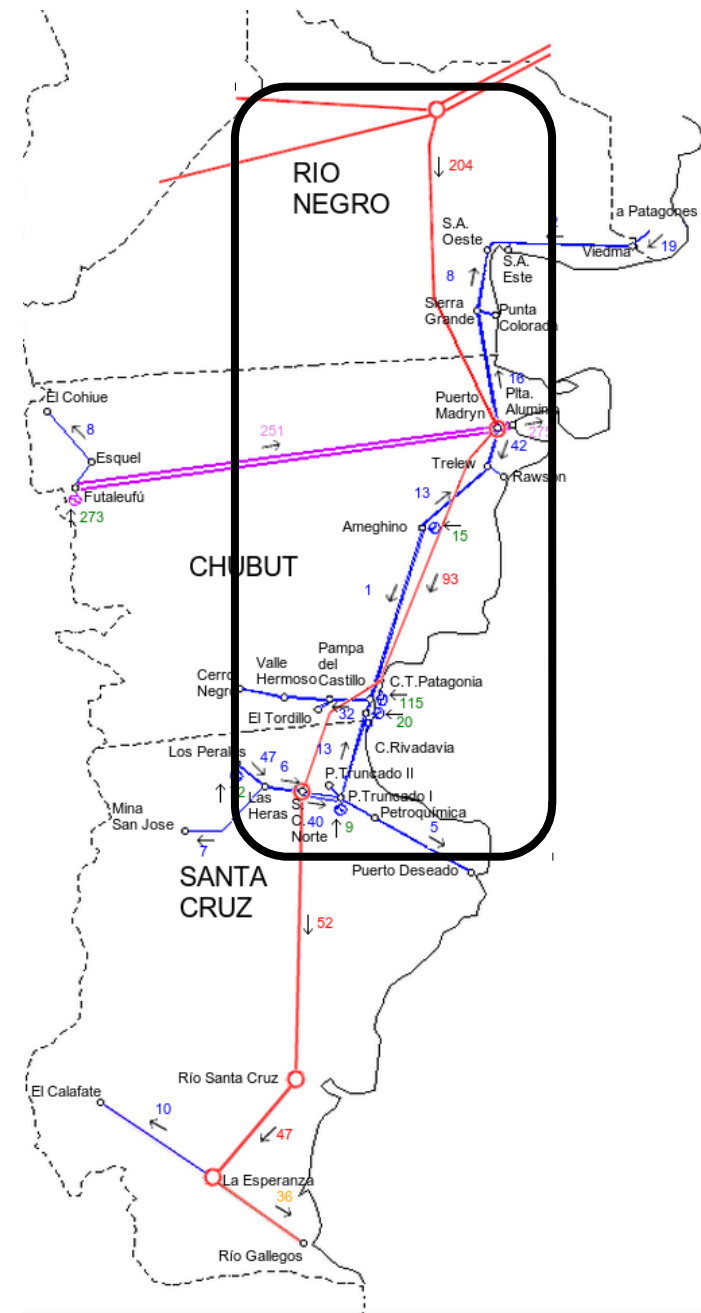
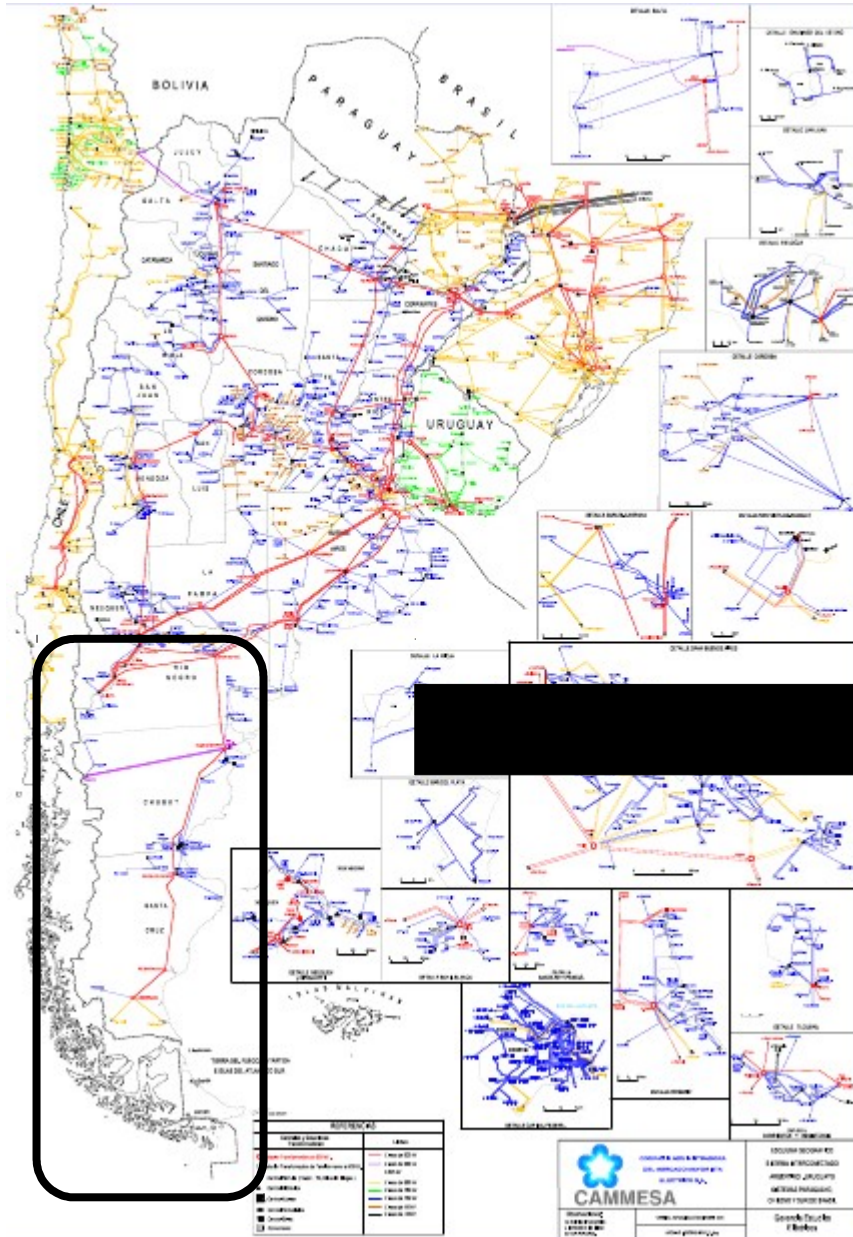
$$\dot{x} = A(\bar{x}, \bar{\mu})x \rightarrow \dot{x}_r = A_r x_r \quad A_r \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$$

¡Los **4 autovalores** de A_r son los autovalores **SSCI**!

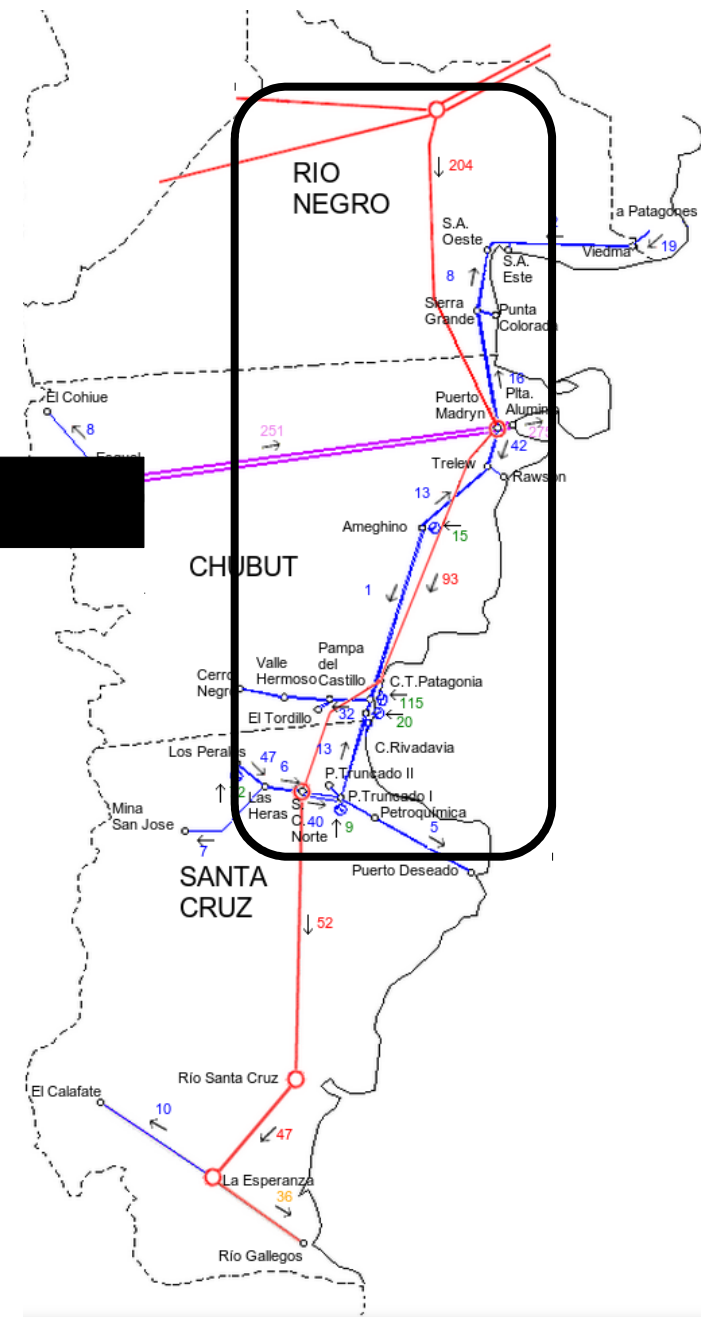
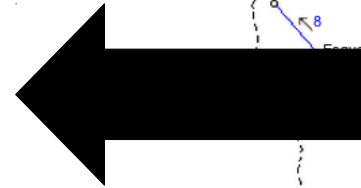
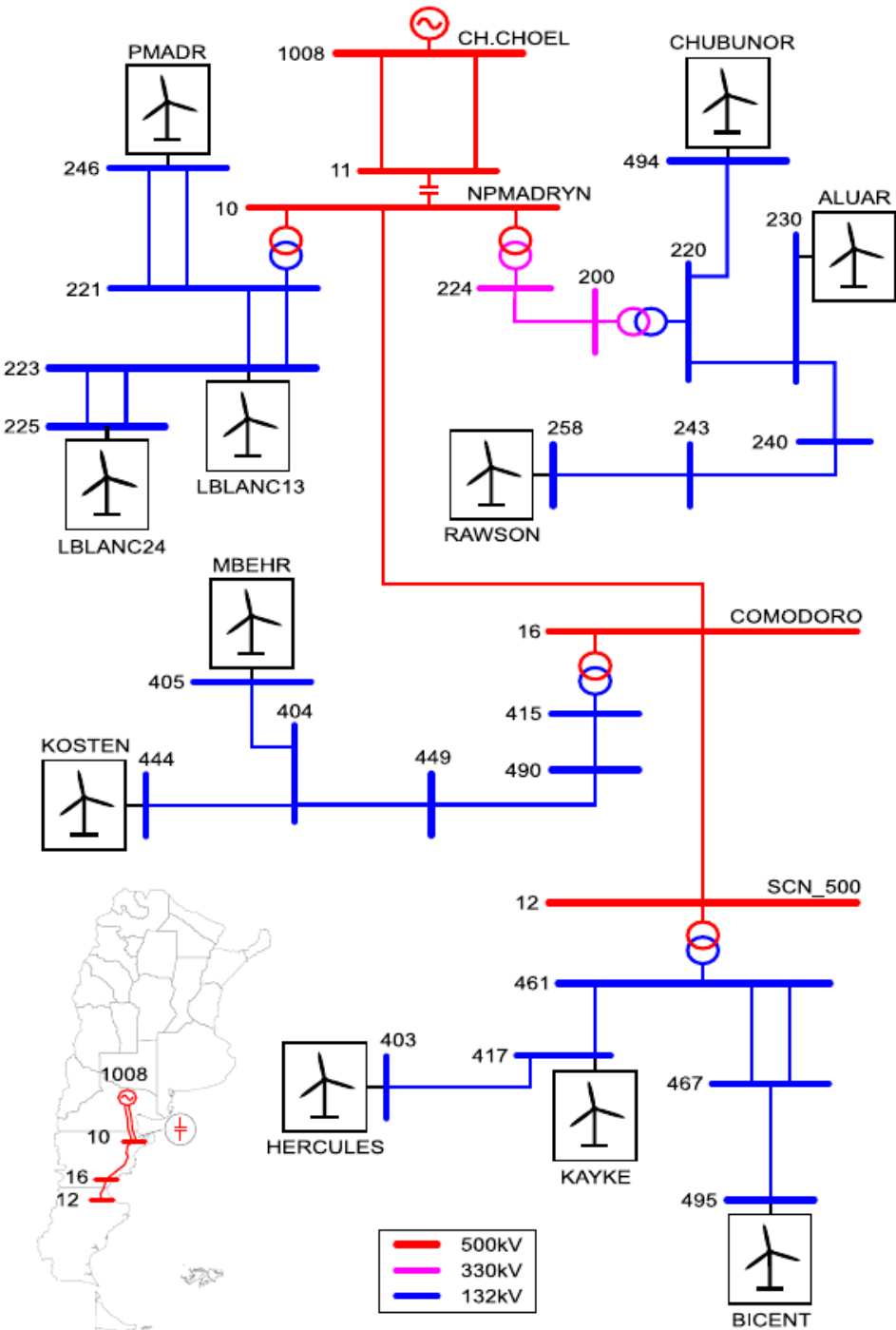
Caso de estudio



Caso de estudio



Caso de estudio



Caso de estudio

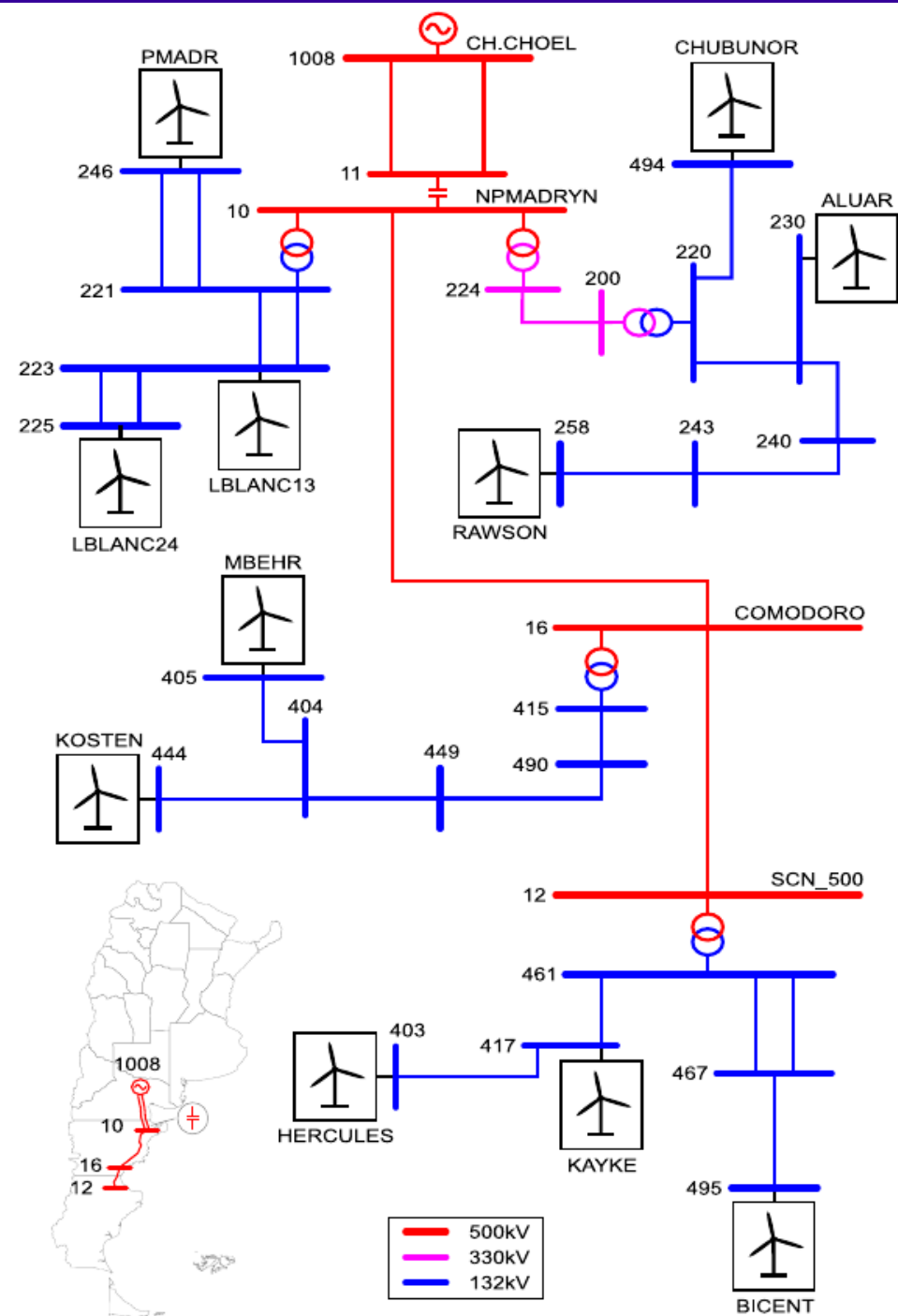


Tabla de parámetros de las líneas

Barras	Impedancia			Voltaje [kV]	Longitud [km]	Obs.
	R	X	B			
1008-11	2.750E-3	3.384E-2	4.1888	500	354	2 líneas
11-10	-	X_c^\dagger	-	-	-	Compens.
10-221	0	3.000E-2	-	500/132	-	Trafo
221-246	6.337E-3	2.579E-2	0.0060	132	13	2 líneas
221-223	2.047E-2	8.332E-2	0.0194	132	42.5	2 líneas
223-225	2.427E-3	9.879E-3	0.0023	132	5	2 líneas
10-224	0	2.700E-2	-	500/330	-	Trafo
224-200	2.000E-5	1.400E-4	0.0018	330	0.47	-
200-220	0	1.400E-2	-	330/132	-	Trafo
220-494	1.178E-2	3.866E-2	0.0076	132	16	-
220-230	3.170E-3	1.243E-2	0.0029	132	5.7	-
230-253	6.300E-3	2.290E-2	0.0051	132	10	-
230-240	4.306E-2	1.423E-1	0.0310	132	62	-

Tabla de parámetros generación y carga

Parque	POI	Trafo*	Colectores			Trafo**	P [MW]
		X_T	R	X	B	X_T	
PMADR	246	2.000E-1	1.645E-2	1.667E-2	0.0088	1.607E-1	50
		2.000E-1	3.853E-2	3.812E-2	0.0048	1.607E-1	20
		2.000E-1	1.546E-2	1.581E-2	0.0097	1.607E-1	50
		2.000E-1	1.959E-2	2.004E-2	0.0102	1.607E-1	50
		2.000E-1	1.496E-2	1.499E-2	0.0094	1.607E-1	50
LBLANC13	223	1.250E-1	1.047E-2	1.896E-2	0.0489	1.800E-1	50
		1.250E-1	1.357E-2	1.345E-2	0.0048	1.800E-1	50
LBLANC24	225	1.250E-1	1.008E-2	1.652E-2	0.0221	1.800E-1	50
		1.250E-1	8.610E-3	1.949E-2	0.0024	1.800E-1	50

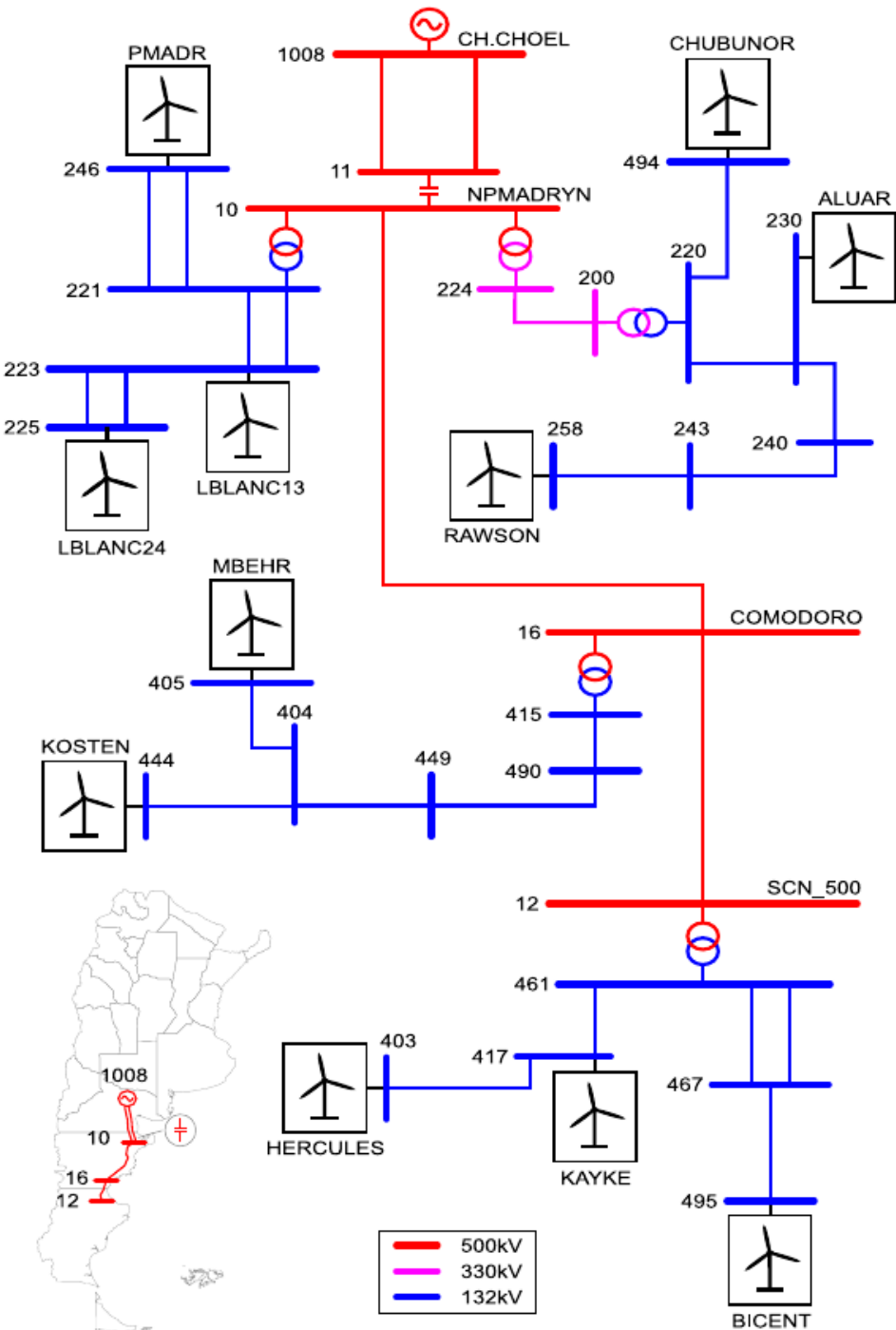
$$\dot{x} = f(x, \mu) \quad x \in \mathbb{R}^{690}$$

Caso de estudio

$$\dot{x} = f(x, \mu) \quad x \in \mathbb{R}^{690}$$

Procedimiento sistemático

1. Definir $\bar{\mu}$



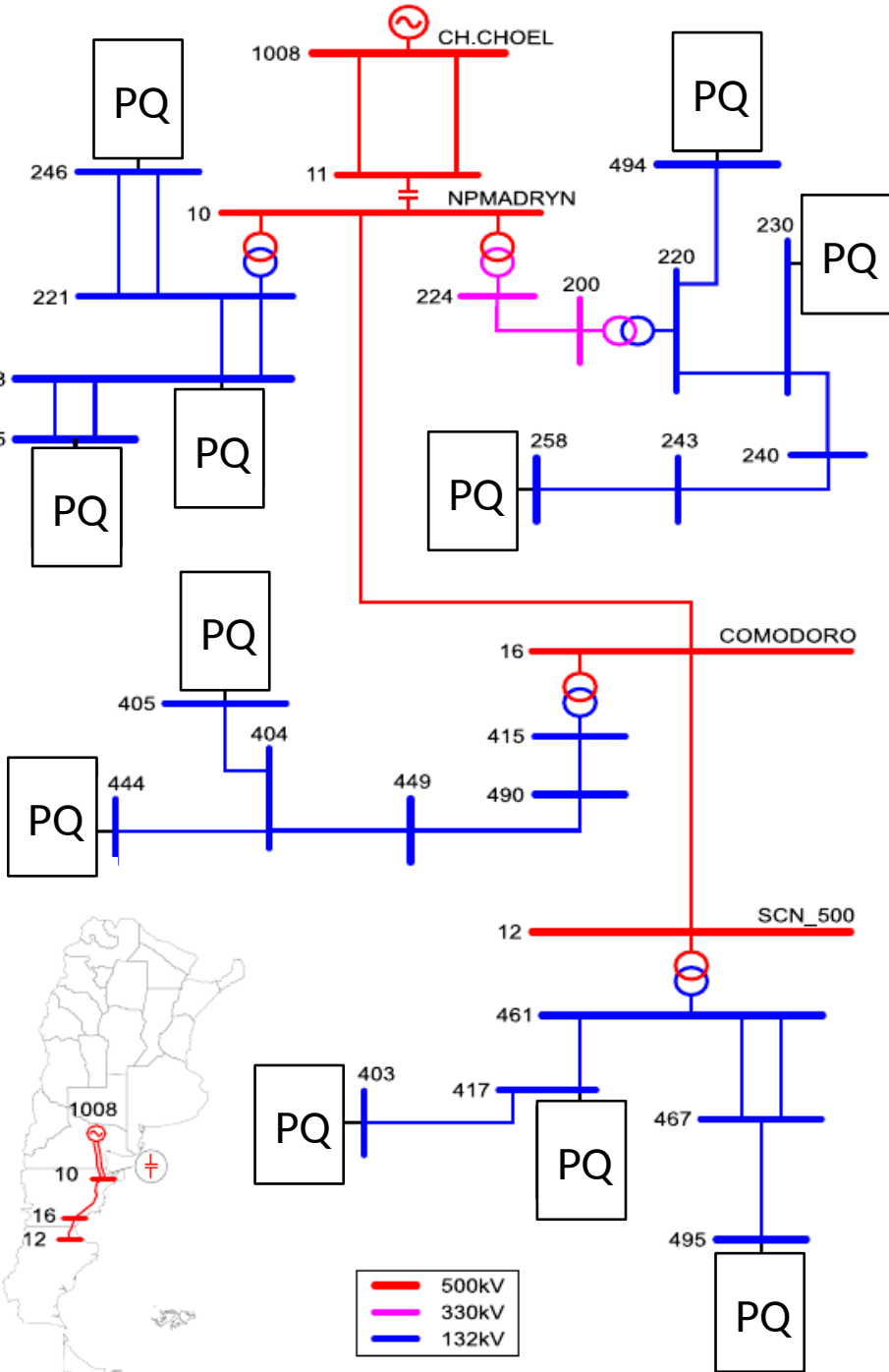
Caso de estudio

$$\dot{x} = f(x, \mu) \quad x \in \mathbb{R}^{690}$$

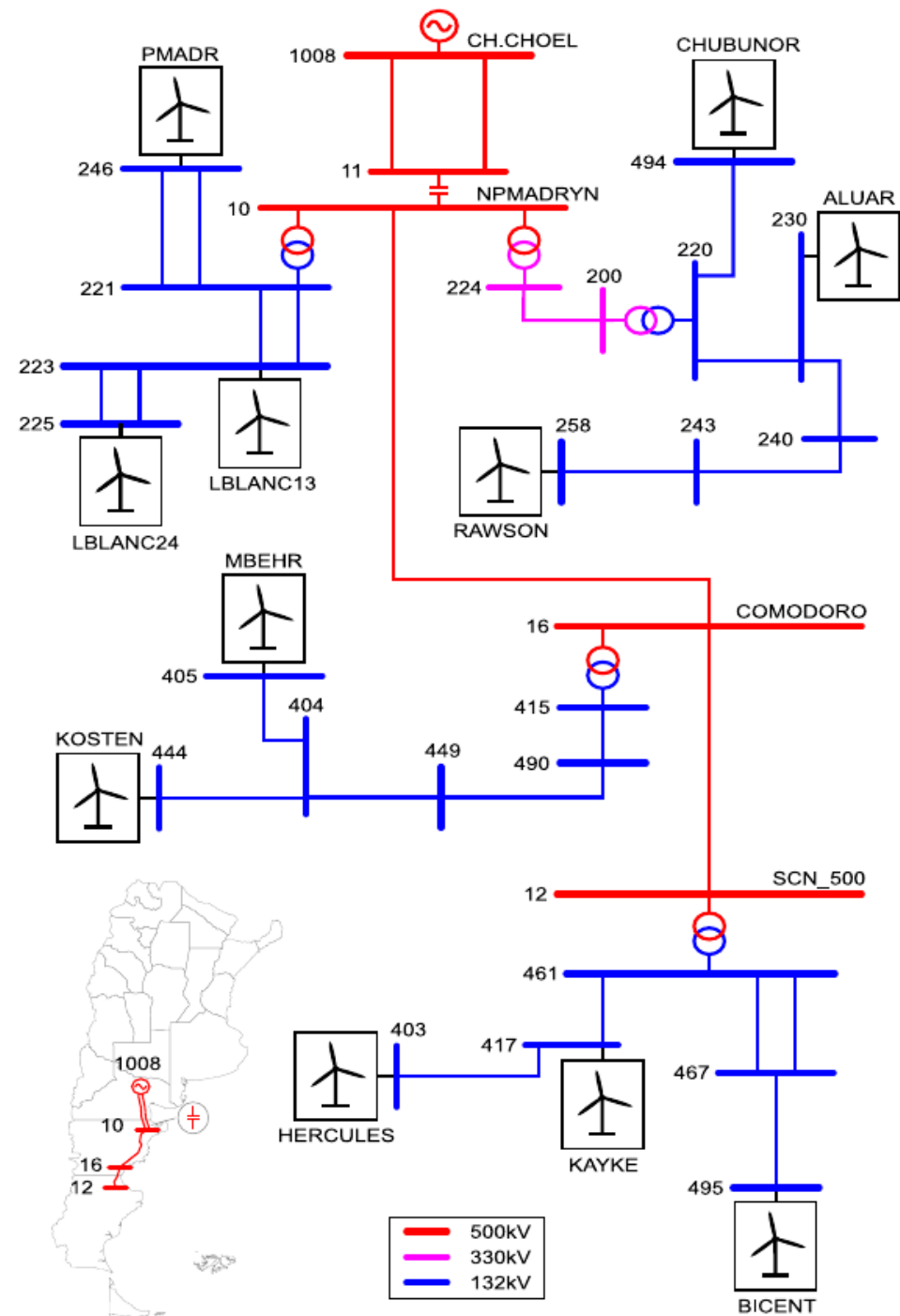
Procedimiento sistemático

1. Definir $\bar{\mu}$
2. Calcular una semilla para el equilibrio x^*
 - 2.1 Calcular flujos de potencia

$$\sum \{P, Q\} = 0 \quad \longrightarrow \quad i_L^* \quad v_b^*$$



Caso de estudio



$$\dot{x} = f(x, \mu) \quad x \in \mathbb{R}^{690}$$

Procedimiento sistemático

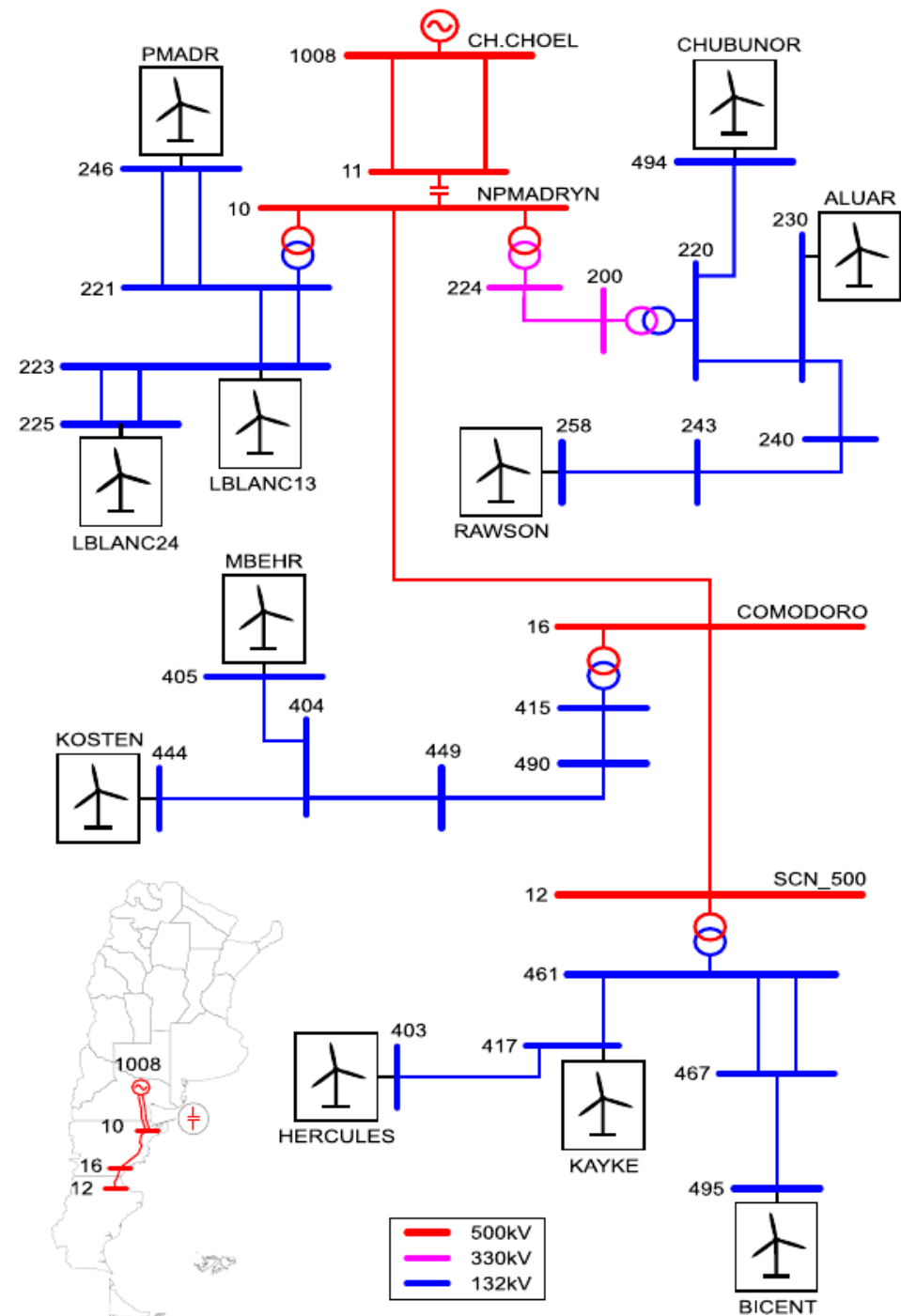
1. Definir $\bar{\mu}$
2. Calcular una semilla para el equilibrio x^*
 - 2.1 Calcular flujos de potencia

$$\sum \{P, Q\} = 0 \longrightarrow i_L^* \ v_b^*$$

- 2.2 Se resuelve el equilibrio en cada parque

$$\dot{x}_{P\{i\}} = f(x_{P\{i\}}) = 0 \longrightarrow x_{P\{i\}}^*$$

Caso de estudio



$$\dot{x} = f(x, \mu) \quad x \in \mathbb{R}^{690}$$

Procedimiento sistemático

1. Definir $\bar{\mu}$
2. Calcular una semilla para el equilibrio x^*
 - 2.1 Calcular flujos de potencia

$$\sum \{P, Q\} = 0 \longrightarrow i_L^* v_b^*$$

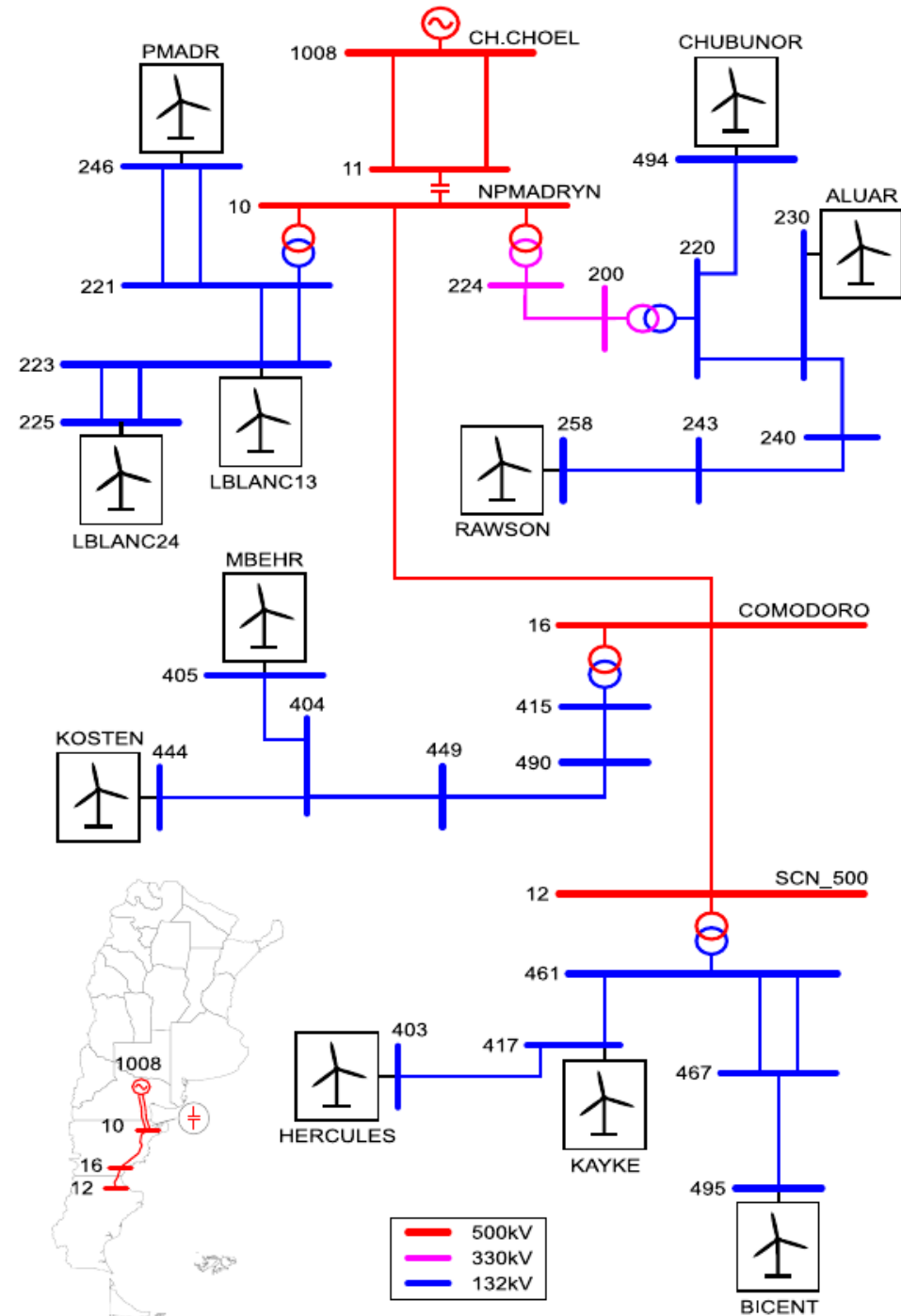
- 2.2 Se resuelve el equilibrio en cada parque

$$\dot{x}_{P\{i\}} = f(x_{P\{i\}}) = 0 \longrightarrow x_{P\{i\}}^*$$

- 2.3 Con la semilla $x^* = \{i_L^*, v_b^*, x_{P\{i\}}^*\}$

$$\dot{x} = f(x, \bar{\mu}) = 0 \longrightarrow \bar{x}$$

Caso de estudio



$$\dot{x} = f(x, \mu) \quad x \in \mathbb{R}^{690}$$

Procedimiento sistemático

1. Definir $\bar{\mu}$
2. Calcular una semilla para el equilibrio x^*
 - 2.1 Calcular flujos de potencia

$$\sum \{P, Q\} = 0 \longrightarrow i_L^* \ v_b^*$$

- 2.2 Se resuelve el equilibrio en cada parque

$$\dot{x}_{P\{i\}} = f(x_{P\{i\}}) = 0 \longrightarrow x_{P\{i\}}^*$$

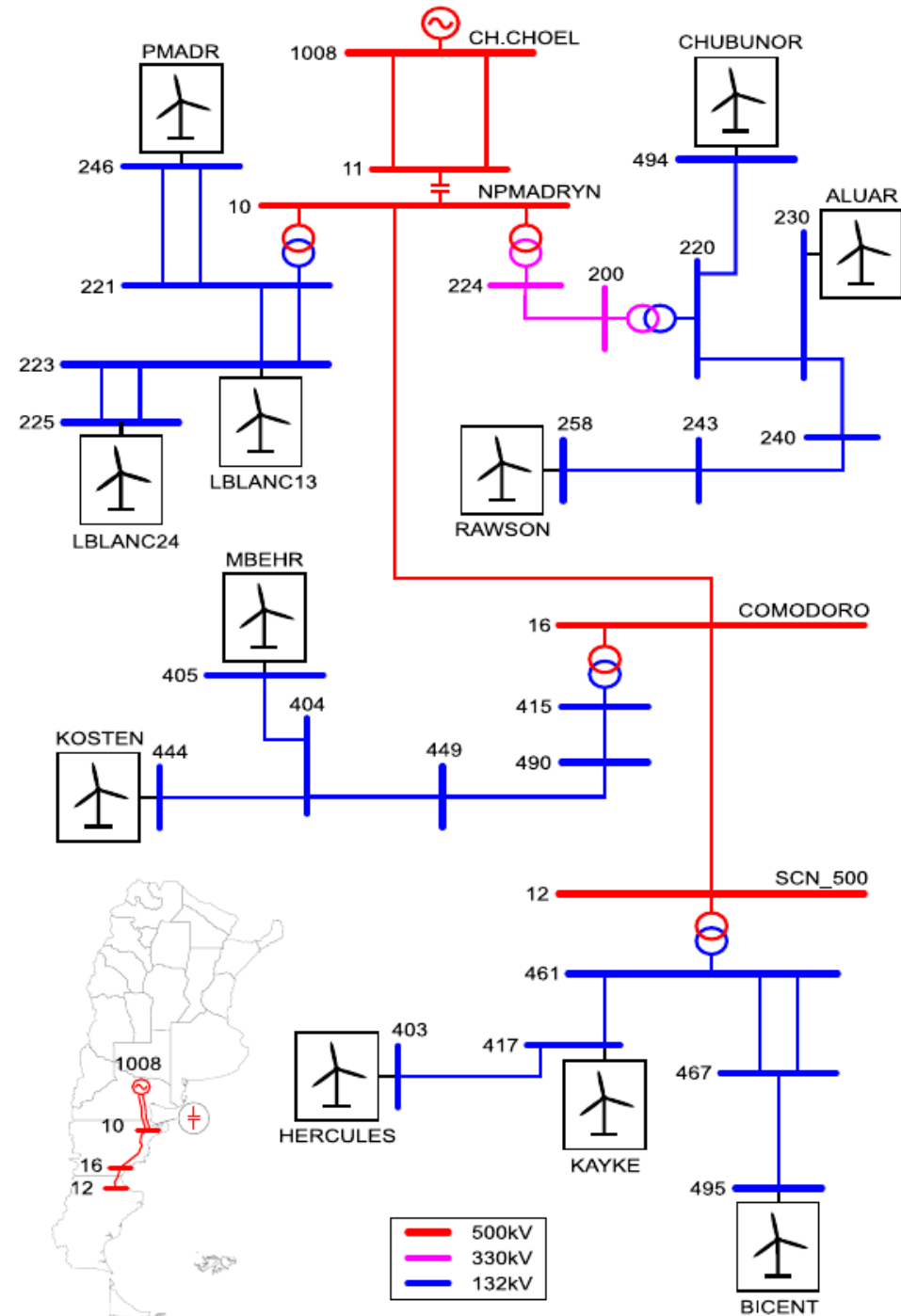
- 2.3 Con la semilla $x^* = \{i_L^*, v_b^*, x_{P\{i\}}^*\}$

$$\dot{x} = f(x, \bar{\mu}) = 0 \longrightarrow \bar{x}$$

3. Obtener

$$A(\bar{x}, \bar{\mu}) = \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{(\bar{x}, \bar{\mu})}$$

Caso de estudio



$$\dot{x} = f(x, \mu) \quad x \in \mathbb{R}^{690}$$

Procedimiento sistemático

1. Definir $\bar{\mu}$
2. Calcular una semilla para el equilibrio x^*
 - 2.1 Calcular flujos de potencia

$$\sum \{P, Q\} = 0 \longrightarrow i_L^* \ v_b^*$$

- 2.2 Se resuelve el equilibrio en cada parque

$$\dot{x}_{P\{i\}} = f(x_{P\{i\}}) = 0 \longrightarrow x_{P\{i\}}^*$$

- 2.3 Con la semilla $x^* = \{i_L^*, v_b^*, x_{P\{i\}}^*\}$

$$\dot{x} = f(x, \bar{\mu}) = 0 \longrightarrow \bar{x}$$

3. Obtener

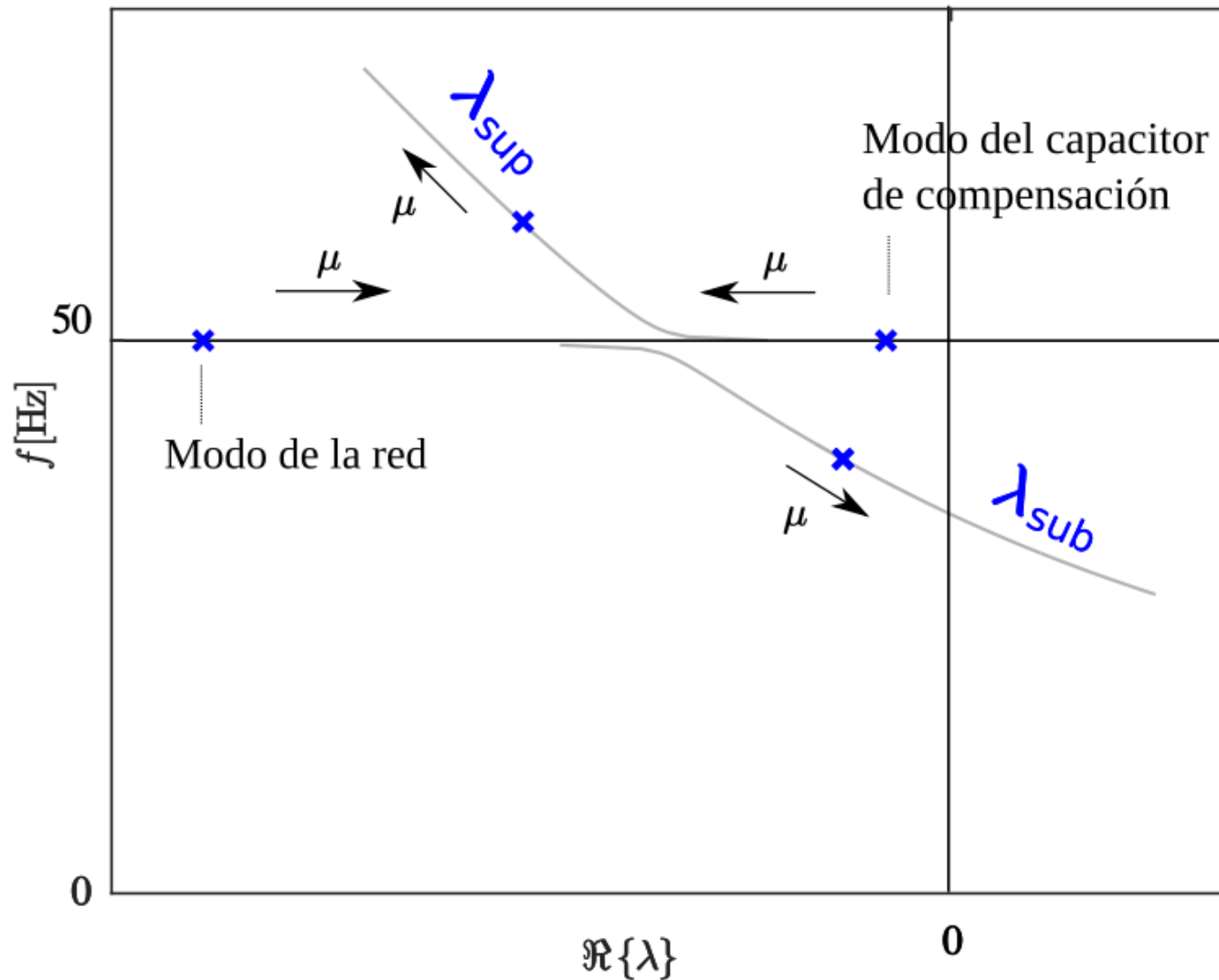
$$A(\bar{x}, \bar{\mu}) = \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{(\bar{x}, \bar{\mu})}$$

4. Calcular $A_r \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$ con SMA

(Pasos 2 - 4 para cada $\bar{\mu}$)

Caso de estudio

Ubicación de autovalores SSCI a medida que se aumenta el factor de compensación de la línea



Estado actual de la investigación

Estudio de los autovalores del sistema

- Estudio de interacciones de los autovalores SSCI con otros.
- Influencia de diversos parámetros del sistema en la ubicación de los autovalores de la SSCI.

Análisis Selectivo de Modos (SMA)

- Estudio de convergencia del algoritmo SMA para SSCI.
- Transformación de estados para convergencia de SMA.

Continuación de la condición de inestabilidad

- Implementación de SMA para continuar la inestabilidad en SSCI.
(Encontrar los \bar{x} que sean equilibrio y que además $\Re\{\lambda_{sub}\} = 0$)



Imposible para sistemas de orden mayor a 100.
Posible con **SMA**.

Muchas gracias por su tiempo

¿Preguntas?