



Sistemas HVDC

SESIÓN 3 :  
Estado del Arte en Metodologías y Modelos para HVDC

# Control Suplementario en líneas VSC-HVDC: Modelo por identificación N4Sid.



**Prof. Mario Alberto Ríos, Ph.D.**  
**Profesor Titular**  
**Universidad de los Andes**



Un evento:



# Estado del Arte – Metodologías y Modelos

- **Confiabilidad de sistemas HVDC (incluso HVDC-Grids)**
  - M. A. Ríos, J. L. Vera, M. F. Pérez, “Availability Assessment of VSC-HVDC Grids using OPF-based Remedial Actions”, IET High Voltage, *In Press 2020* (available on-line: DOI: 10.1049/hve.2020.0028)
  - Andrés F. Camargo, Mario A. Ríos, “Reliability Data and Assessment for HVDC Bipolar Links”, 2018 IEEE Transmission and Distribution Conference and Exposition, Denver, USA, Abril 2018.
- **Modelos de Evaluación de costos (Aplicación recomendaciones Cigré)**
  - D. Páez, M.A. Ríos, “Cost Analysis of an MTDC for interconnection Guajira-Cerromatoso-Panama”, FISE/IEEE-CIGRE 2019, Medellín, Colombia, Dec. 2019
- **Conversión de líneas HVAC en HVDC**
  - J.P. Novoa “Metodología para el Planeamiento del Sistema de Transmisión integrado con la Conversión de líneas de HVAC a HVDC”, Tesis Magíster en Ing. Eléctrica, UniAndes, 2015.

# Estado del Arte – Metodologías y Modelos

## • Planeamiento Sistemas HVDC

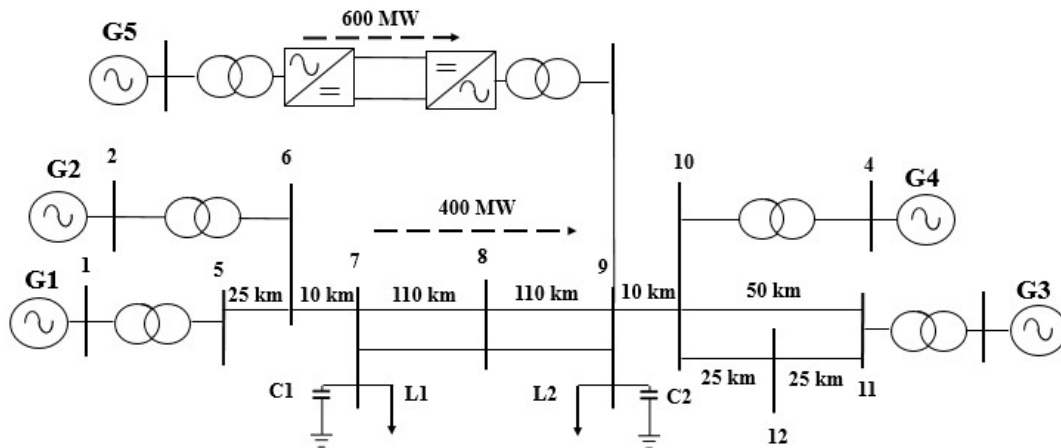
- M.A. Ríos, F.A. Acero, “Planning MTDC Grids based on Graphs Theory”, Int. Journal of Electrical and Computer Eng. (IJECE), *In-Press 2020*.
- A. Ayo, M.A. Ríos, “Alternatives of Development of SINEA Project in VSC-HVDC”, 2020 IEEE Transmission and Distribution Conference and Exposition, Chicago, USA, October 2020

## • Contribuciones de VSC-HVDC en estabilidad de sistemas AC

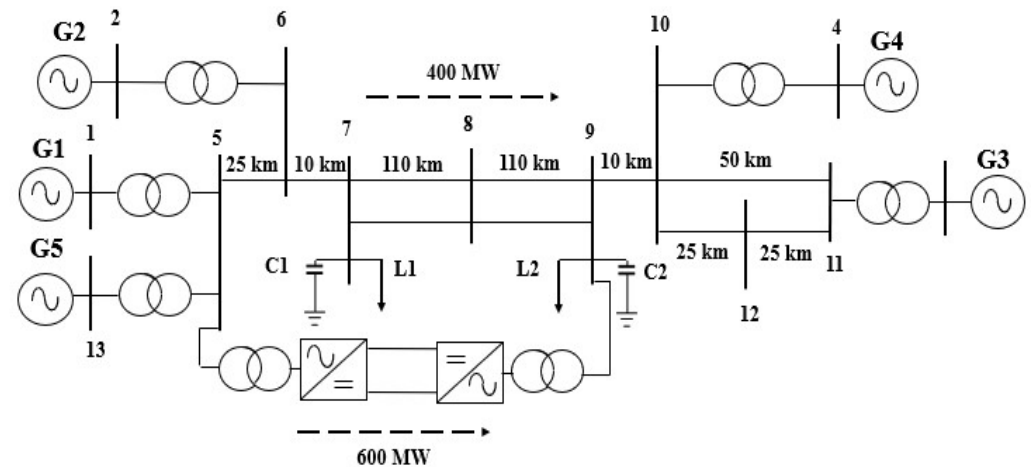
- M. A. Ríos, E. G. Guama, “System Congestion Criteria for Interconnection of WPP through VSC-HVDC”, IET Generation, Transmission and Distribution, Vol. 13, No. 12, pp. 2526-2532, Junio 2019.
- J.S. Laverde, M. A. Ríos, “Damping electromechanical oscillations using supplementary controls at VSC-HVDC stations based on reduced low order models”, Control Engineering Practice, Vol. 79, pp. 195-208, Oct. 2018.
- D.F. Santos, M.A. Ríos, “Coordinated Robust Supplementary Controls in Embedded VSC-HVDC Lines for Damping Electromechanical Oscillations”, International Review of Electrical Engineering, Vol. 13, No. 5, pp. 428-439, Sept.-Oct. 2018.

# Control Suplementario en líneas VSC-HVDC

- Objetivo:  
Amortiguamiento de modos electromecánicos débiles en el sistema AC
- Tipos de enlaces:



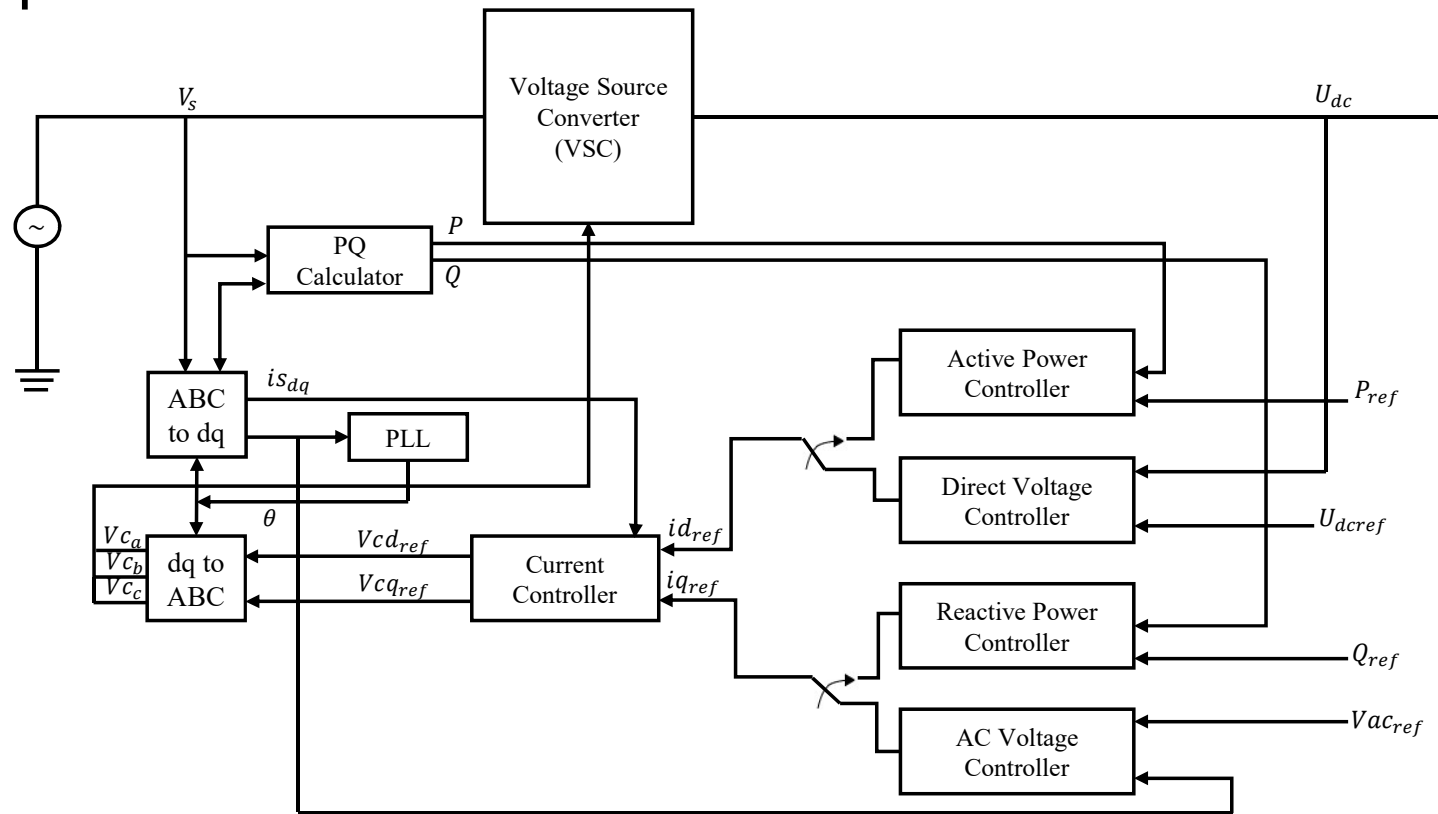
Conexión HVDC-VSC punto a punto.



Conexión HVDC-VSC embebida.

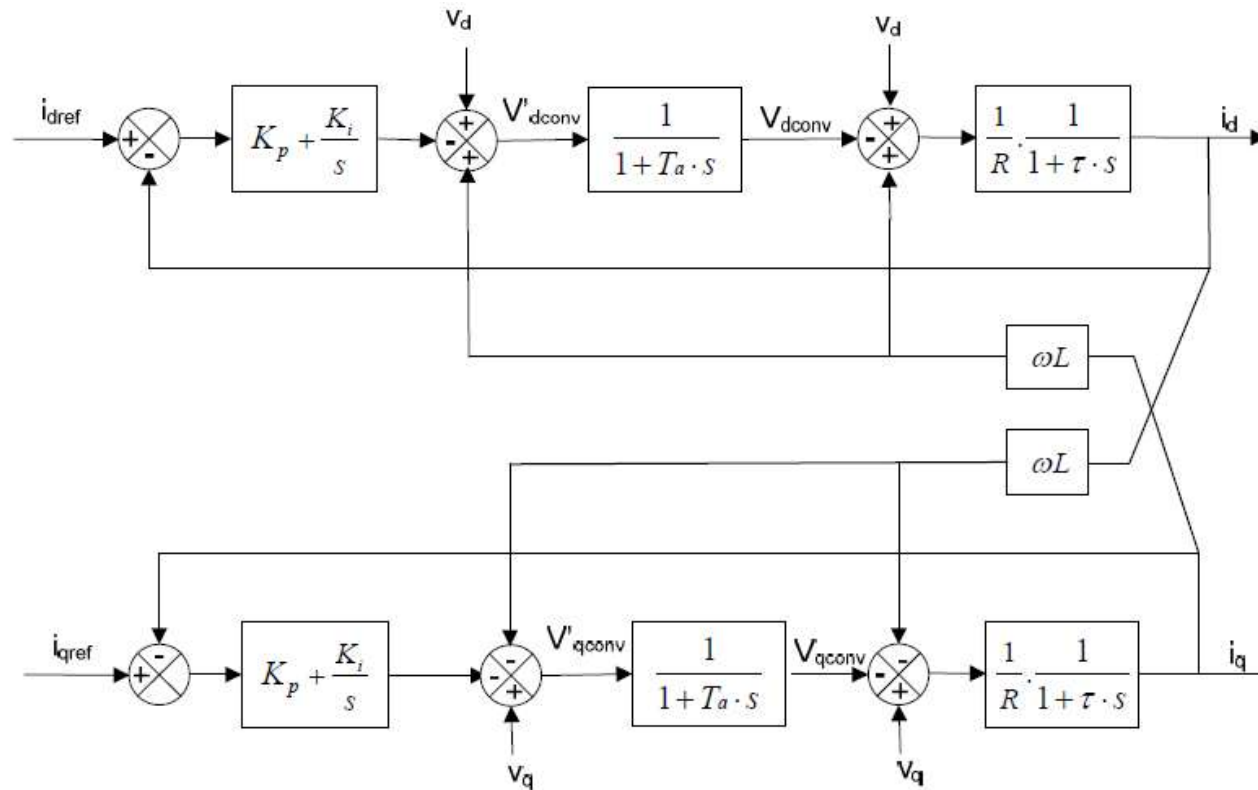
# Control Suplementario en líneas VSC-HVDC

- Control primario de la estación VSC



# Control Suplementario en líneas VSC-HVDC

- Control primario de la estación VSC



# Modelos para el Diseño de Controladores

- Modelos de estado lineal

$$\begin{aligned} [\dot{\Delta x}] &= [A] [\Delta x] + [B] [u] \\ [\Delta y] &= [C] [\Delta x] \end{aligned}$$

- Opción 1: formulación analítica
  - ¿Disponible en software comercial?
- Opción 2: modelo identificado
  - ¿Se puede hacer con software comercial?
  - Método N4Sid

## N4SID

Es un método inspirado en la derivación de modelos de estado para sistemas MIMO usando solo datos de entrada/salida (medidos o simulados)

Para una representación de estado dada como:

$$\begin{aligned}x(k+1) &= Ax(k) + Bu(k) \\ y(k) &= Cx(k) + Du(k)\end{aligned}$$

1. Definir datos de entrada y salida
2. Representar los datos I/O como un vector de estado de secuencia de la forma

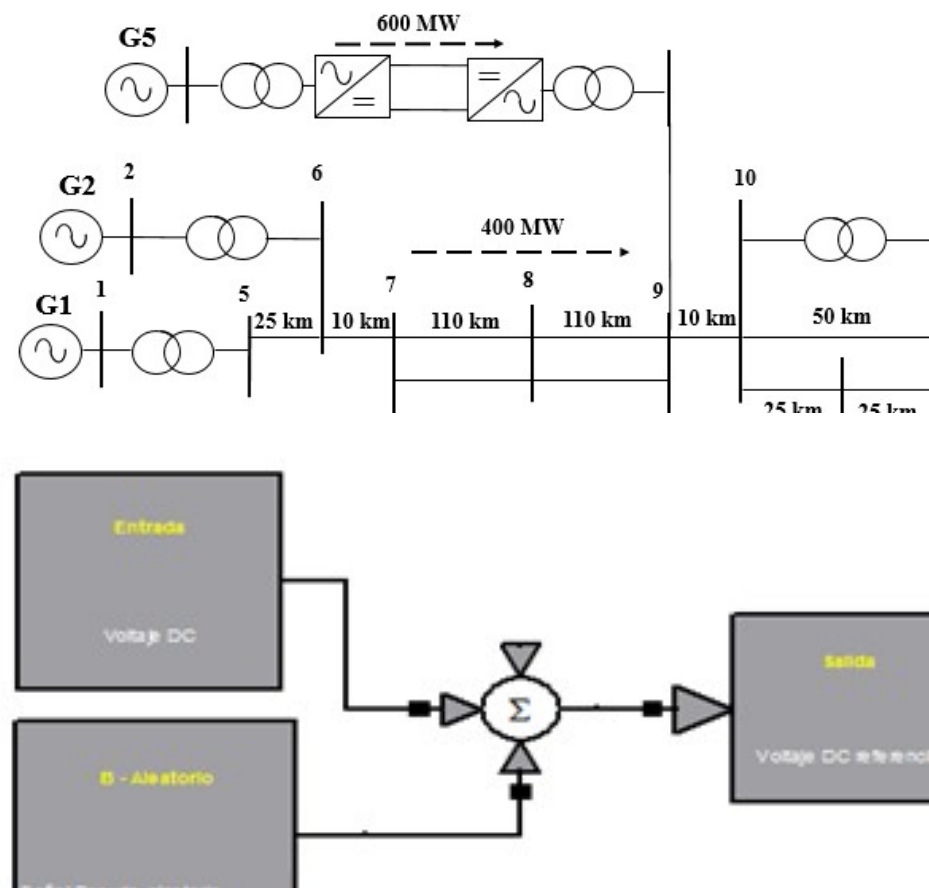
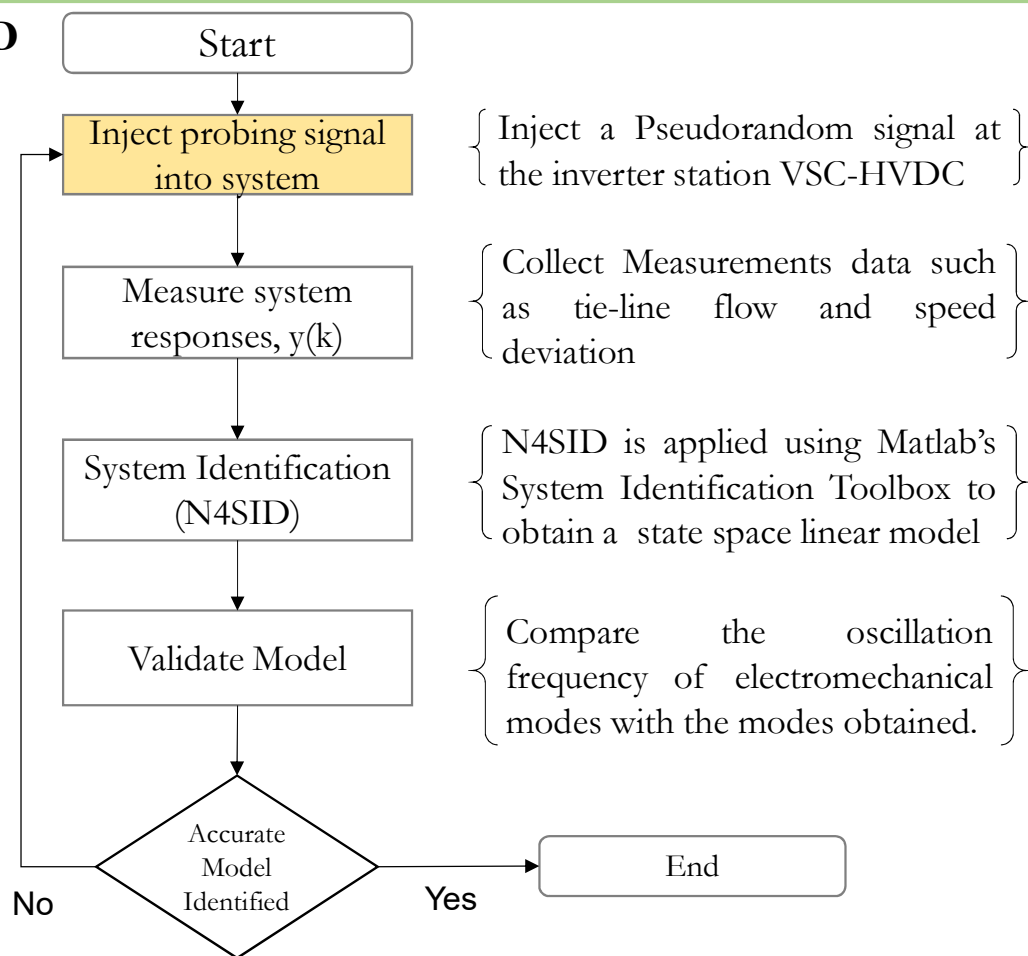
$$\begin{aligned}Y_{h1} &= \Gamma_{i1}X_1 + H_{t1} \cdot U_{h1} \\ Y_{h2} &= \Gamma_{i2}X_2 + H_{t2} \cdot U_{h2}\end{aligned}$$

3. Resolver el conjunto de ecuaciones lineales obtenido a partir del cálculo de la SVD de H

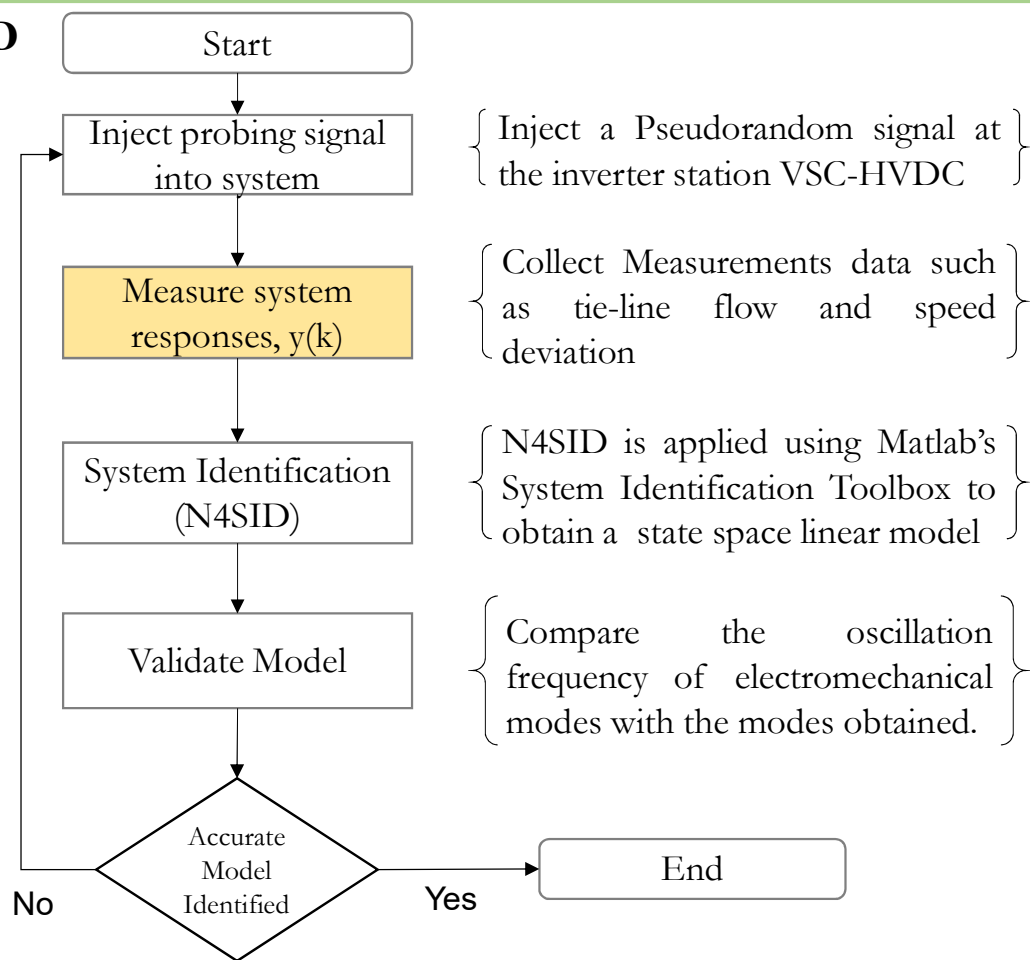
$$\begin{bmatrix} x[k+i+1] & \cdots & x[k+i+j-1] \\ y[k+1] & \cdots & y[k+i+j-2] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x[k+i] & \cdots & x[k+i+j-2] \\ u[k+i] & \cdots & u[k+i+j-2] \end{bmatrix}$$



N4SID

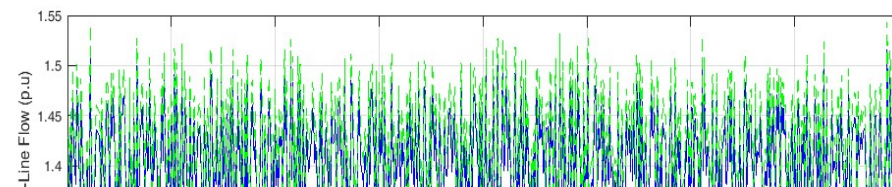
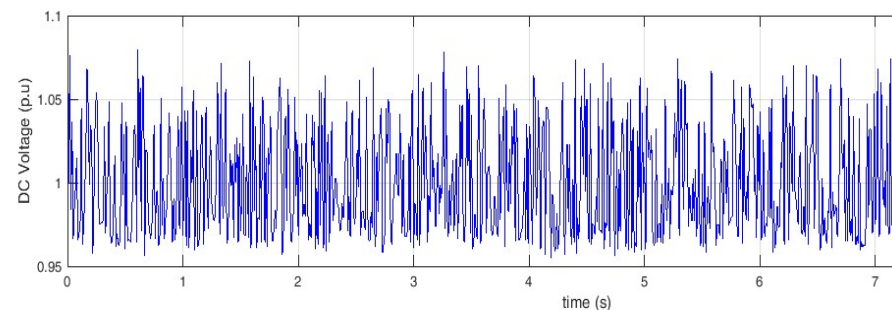


N4SID

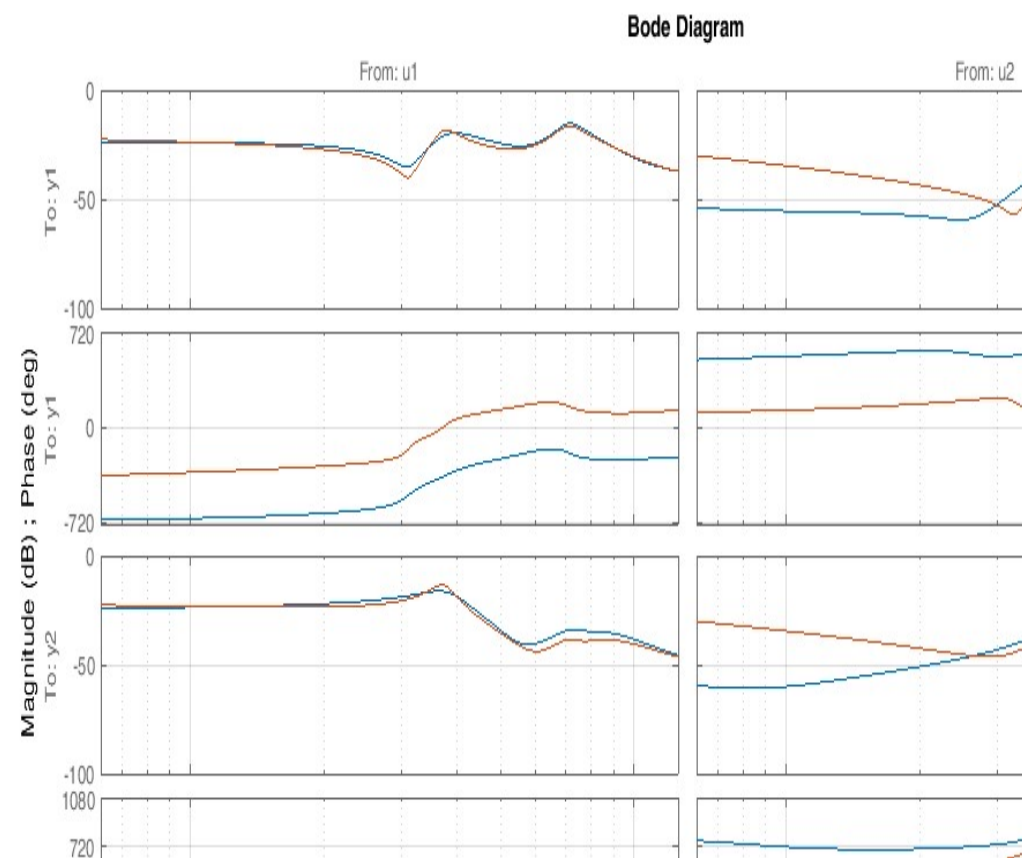
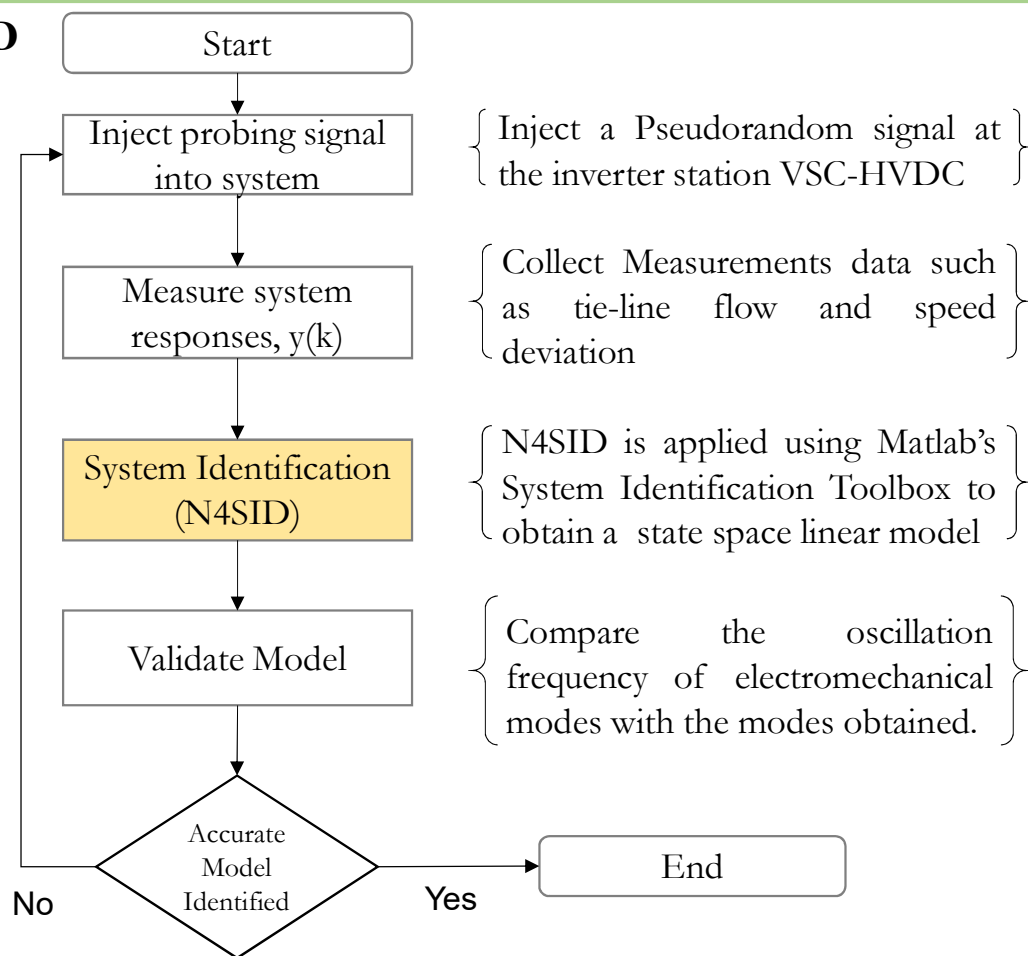


Para este caso se definieron dos modelos posibles

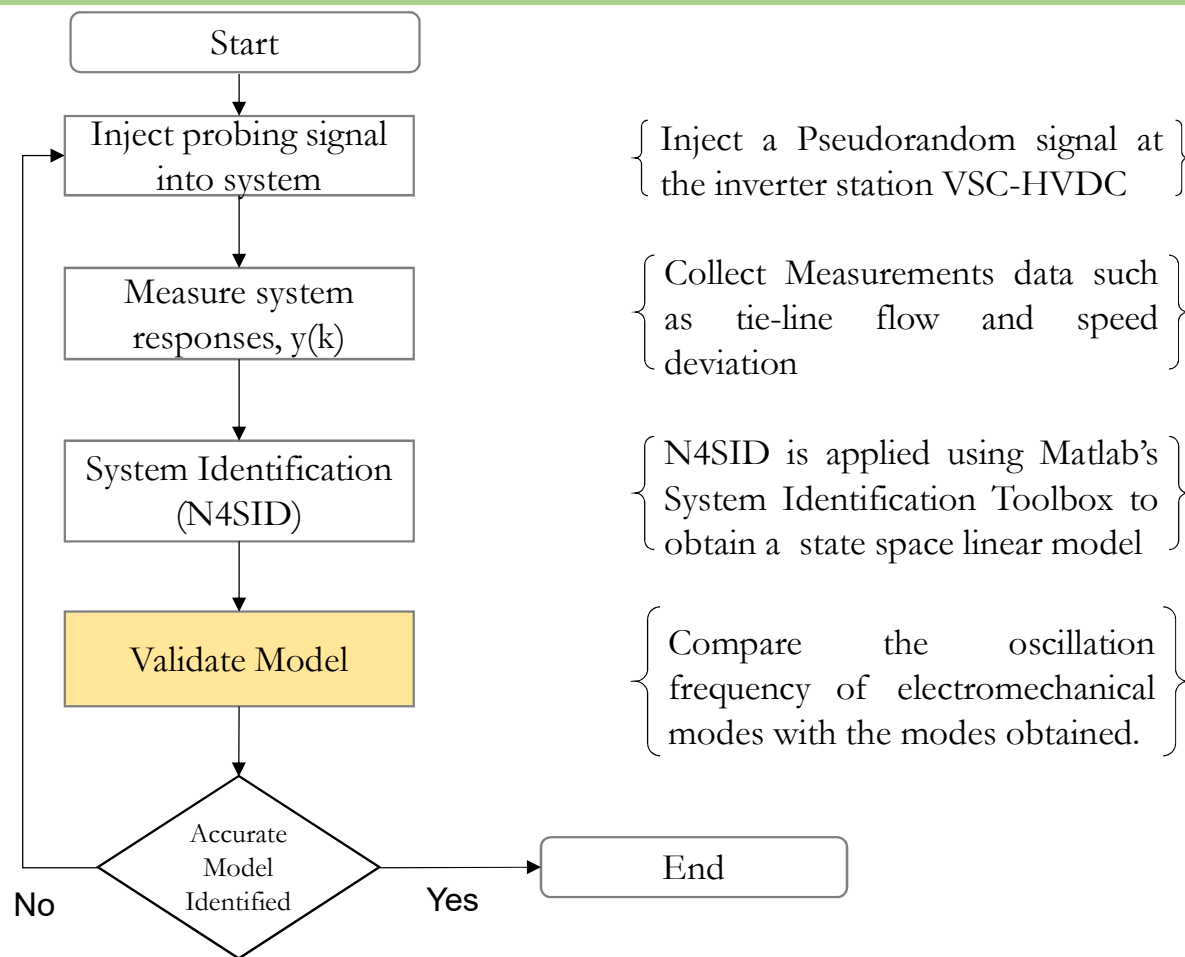
Modelos	1	2
Entrada	$V_{dc-A}, V_{dc-B}$	$V_{dc-A}, V_{dc-B}$
Salidas	$P_{linea}, W_1, W_2, W_3, W_4$	$P_{linea}, W_{promedio}$



N4SID



# Linealización y reducción de orden



## N4SID

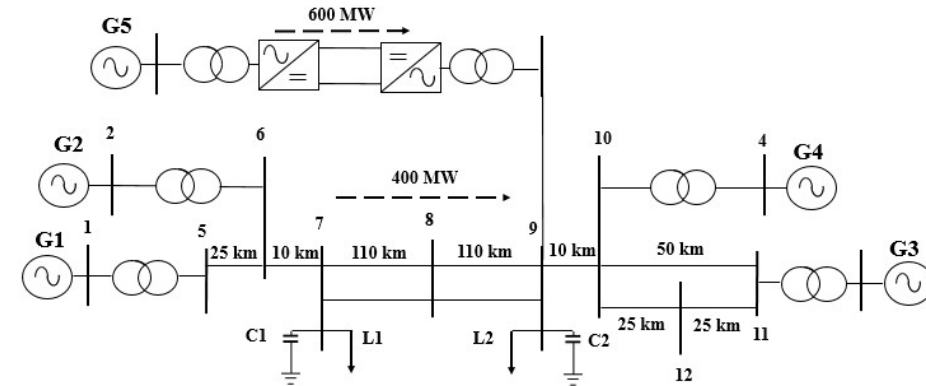
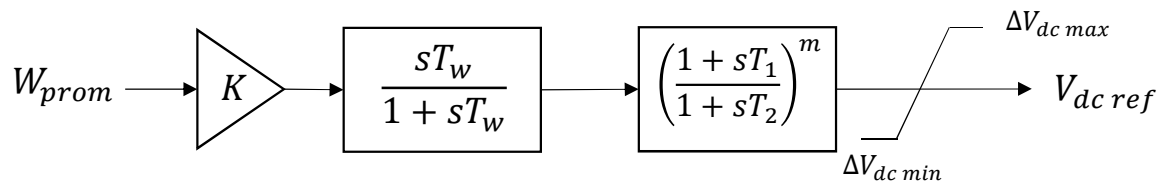
Se utilizó *N4SID* en Matlab para realizar la identificación, se pasó de un modelo con 72 estados a uno de 11.

Modo	Valor propio			Frecuencia [Hz]		
	Sistema completo	Modelo 1	Modelo 2	Sistema completo	Modelo 1	Modelo 2
1	-0,271±4,23i	-0,231±3,81i	-0,327±4,18i	0,673	0,606	0,665
2	-1,731±7,52i	-1,772±7,44i	-1,496±7,64i	1,197	1,184	1,211
3	-1,891±7,95i	-2,605±8,29i	-2,02±7,89i	1,265	1,320	1,256

Se seleccionó el **Modelo No. 2** para el diseño de los controladores utilizando la representación de estados obtenida por identificación N4Sid

# Controlador POD

## • Línea Punto a Punto



Para obtener un máximo amortiguamiento en el rango de frecuencias deseado (0,2 Hz a 3 Hz) se recomienda una compensación de fase de 20° a 40°

$$\alpha = \frac{T_2}{T_1} = \frac{1 - \sin\left(\frac{\phi}{m}\right)}{1 + \sin\left(\frac{\phi}{m}\right)}$$

$$T_1 = \frac{1}{\omega_i \sqrt{\alpha}}, \quad T_2 = \alpha T_1$$

Con  $\omega_i = 4,18 \text{ rad/s}$   $\phi = 40^\circ$  y  $m = 2$

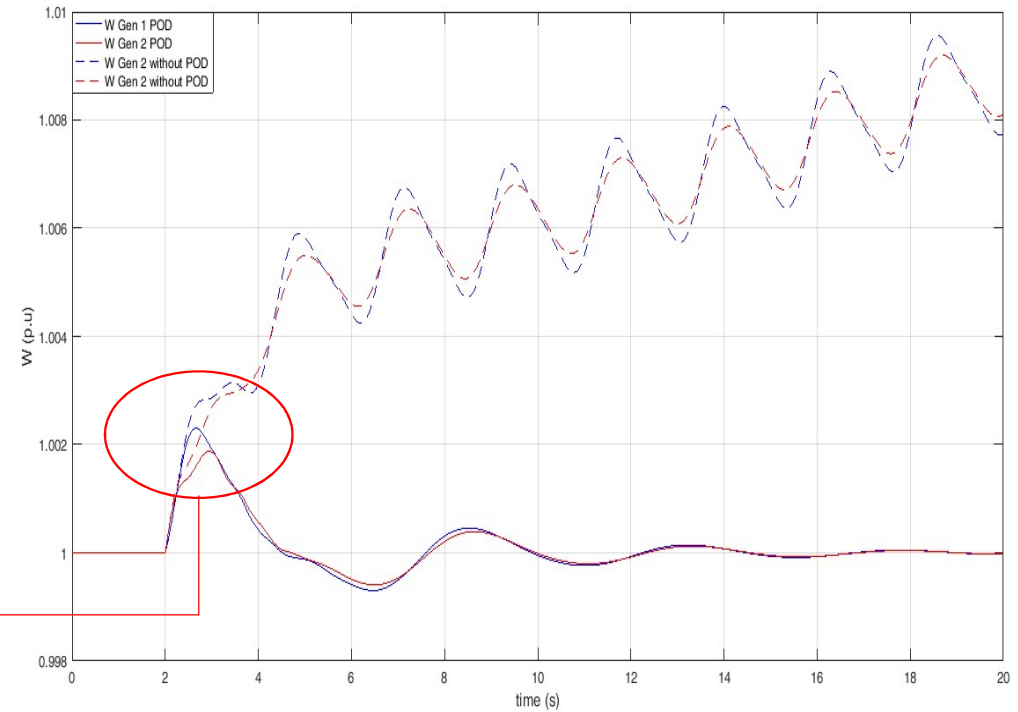
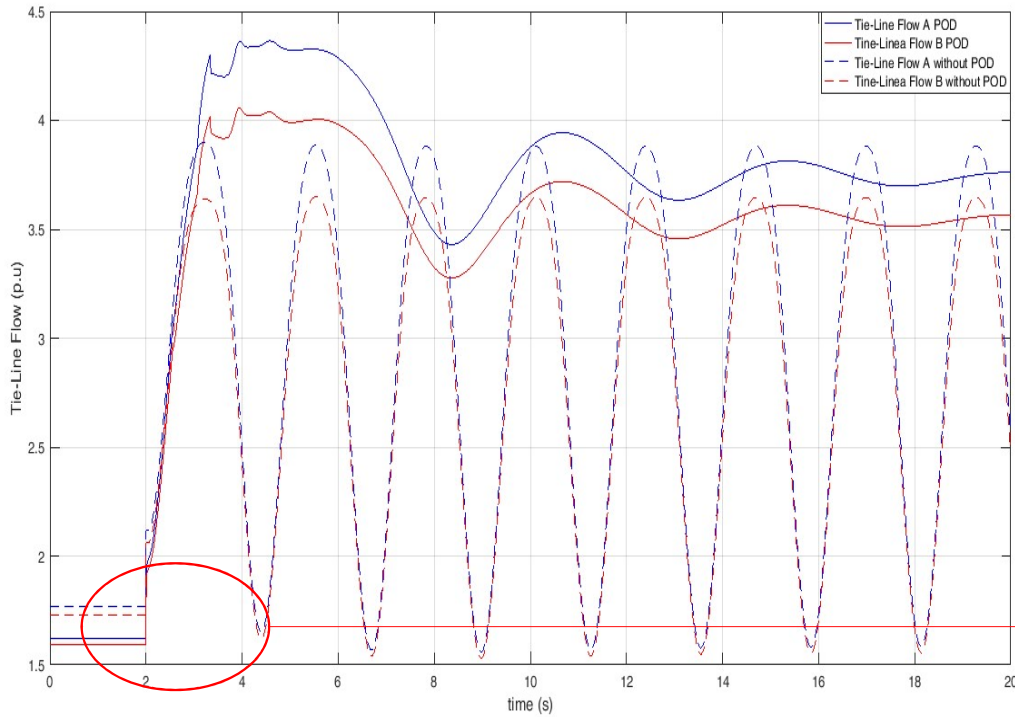
$$\alpha = \frac{T_2}{T_1} = 0,4903$$

$$T_1 = \frac{1}{\omega_i \sqrt{\alpha}} = \mathbf{0,3417}, \quad T_2 = \alpha T_1 = \mathbf{0,1675}$$

P. Kundur, Power System Stability and Control, New York: McGraw- Hill, 1994.

A.A. Fouad, J.D. Mc Calley, A.A. Sallam, "Damping Controller design for power system oscillations using global signals", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 11, No. 1, May 1996

# Controlador POD



Apertura de una línea de interconexión en  $t=2$  s.

S. Laverde, "Control suplementario en estaciones VSC-HVDC para amortiguar oscilaciones electromecánicas", Tesis Magíster Ing. Eléctrica, Universidad de los Andes, 2017

## $H_\infty$ Sensibilidad Mixta

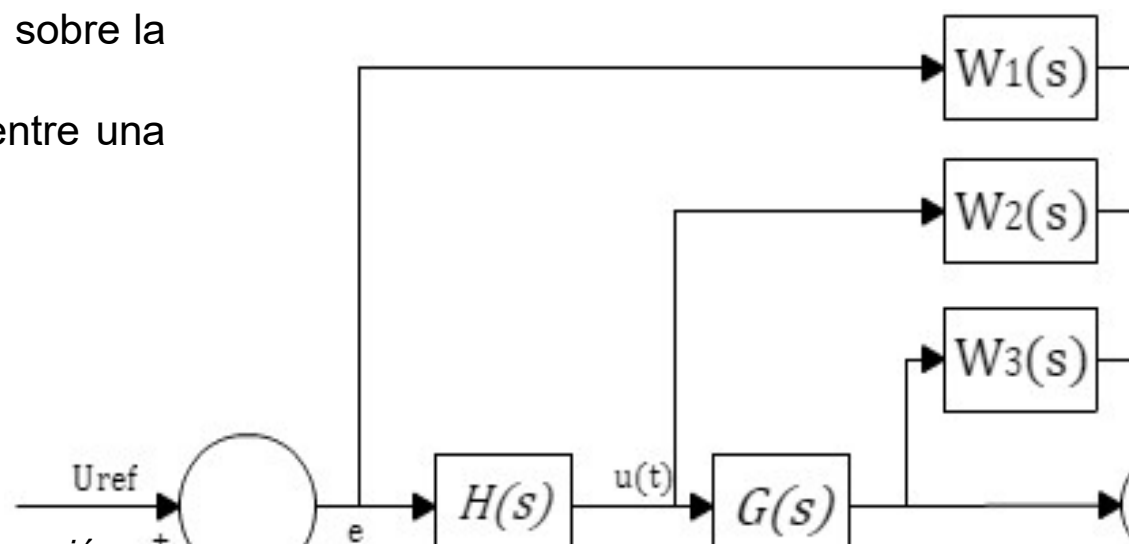
Objetivo: Minimizar el impacto de cualquier perturbación sobre la salida del sistema.

Minimizar la norma  $H_\infty$  de la función de transferencia entre una perturbación  $d(s)$  y la salida  $y(s)$ .

$$\min_{H \in S} \left\| \begin{bmatrix} W_1 S \\ W_3 H S \end{bmatrix} \right\|_\infty < 1$$

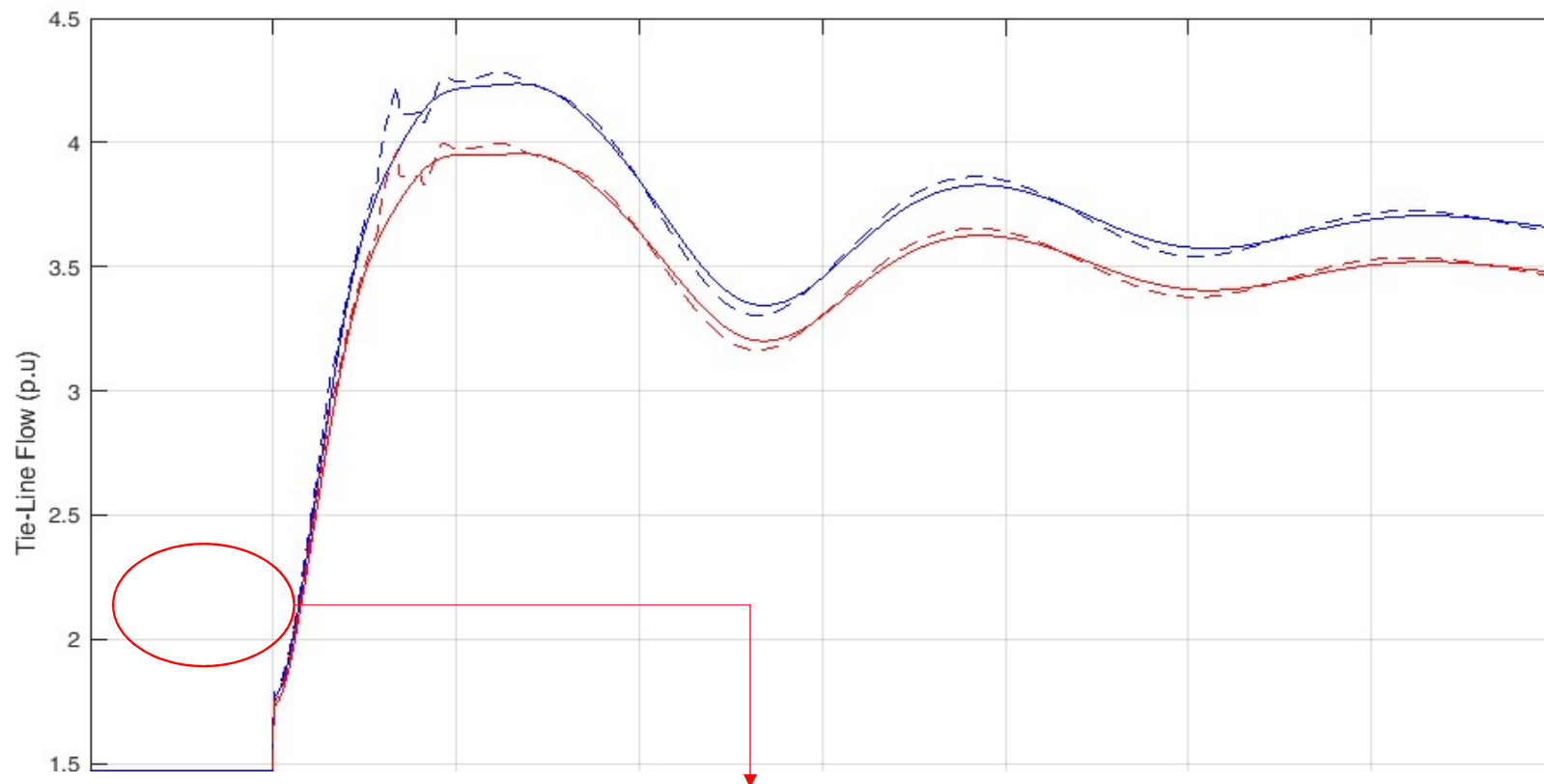
$$S = (I - GH)^{-1}$$

- $G(s)$ : Representa el sistema
- $Z$ : señales de salida dependientes de las funciones de ponderación
- $H(s)$ : Sistema de control
- $W_i(s)$ : Función de ponderación  $i$



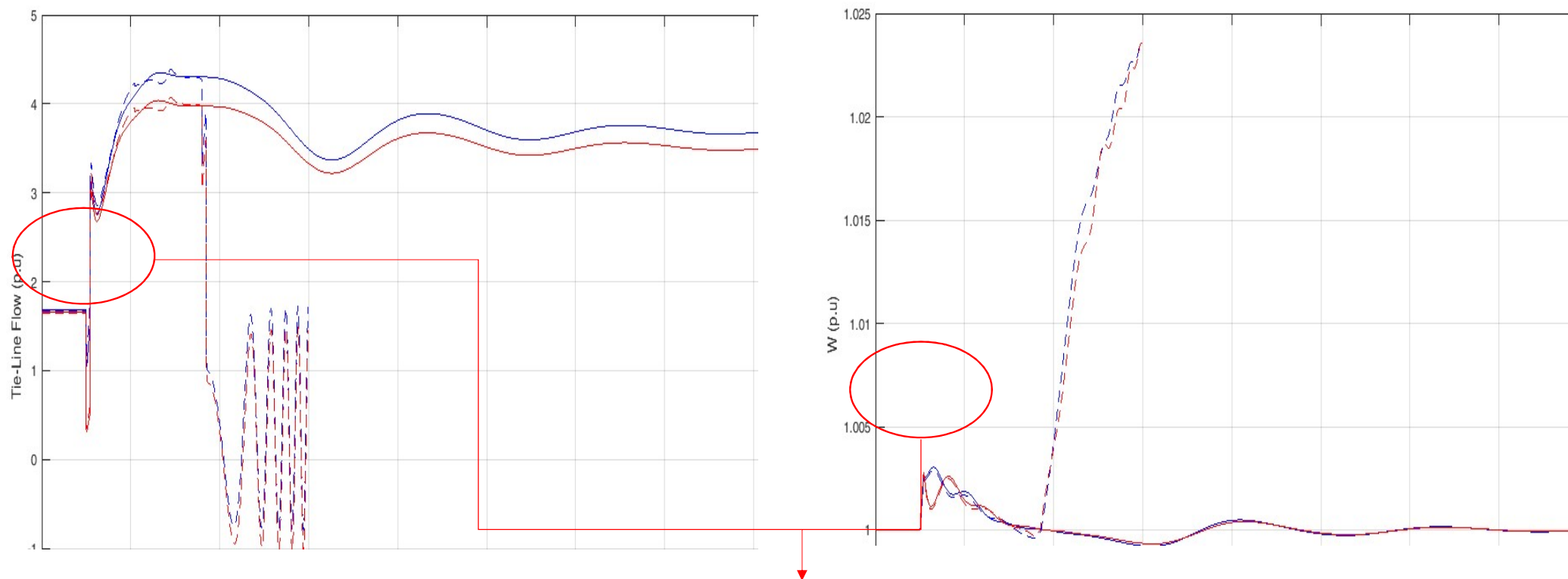


## Control $H_\infty$



Apertura de una línea de interconexión en  $t=2s$

## Control $H_\infty$



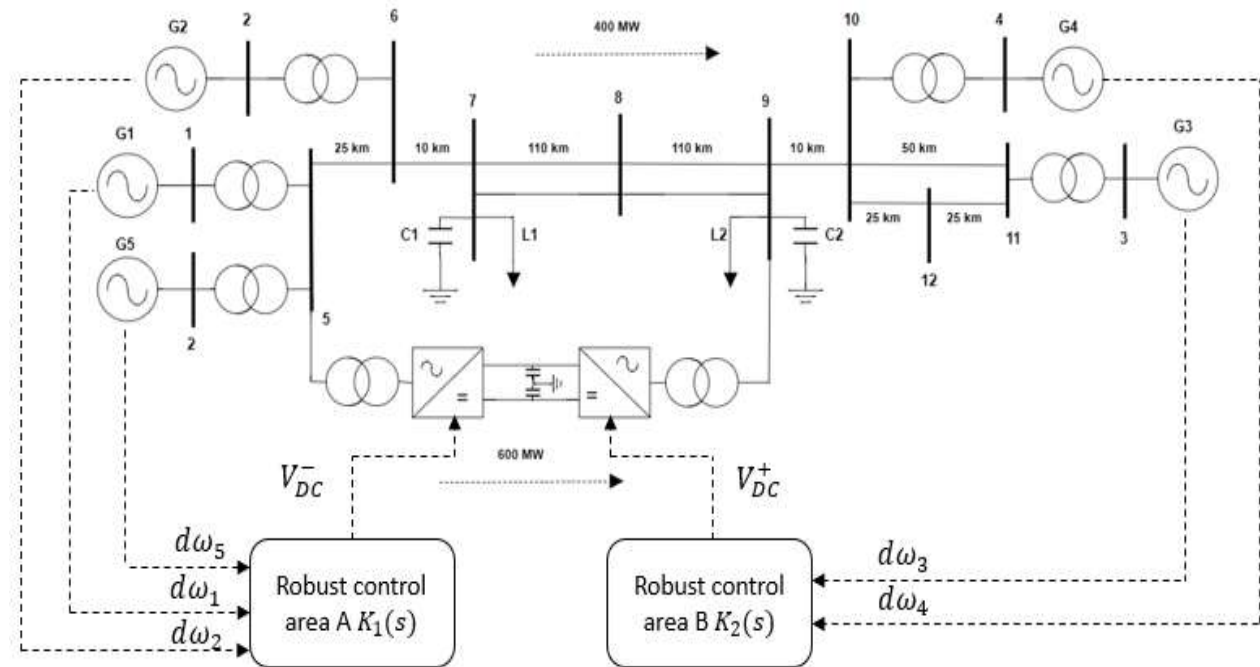
Falla trifásica en  $t=1$  s y apertura de línea en  $t=1,083$  s

# Modelo con líneas HVDC Embebidas

## • Modelo MIMO

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} A_{1,nc}^{(m-2) \times (m-2)} & \dots & 0 \\ \vdots & A_{2,nc}^{(n-2) \times (n-2)} & \vdots \\ 0 & \dots & A_c^{2 \times 2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{1,nc} \\ x_{2,nc} \\ x_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{1,nc}^{(m-2) \times 1} & 0 \\ 0 & B_{2,nc}^{(n-2) \times 1} \\ B_{1,c}^{2 \times 1} & B_{2,c}^{2 \times 1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix}$$

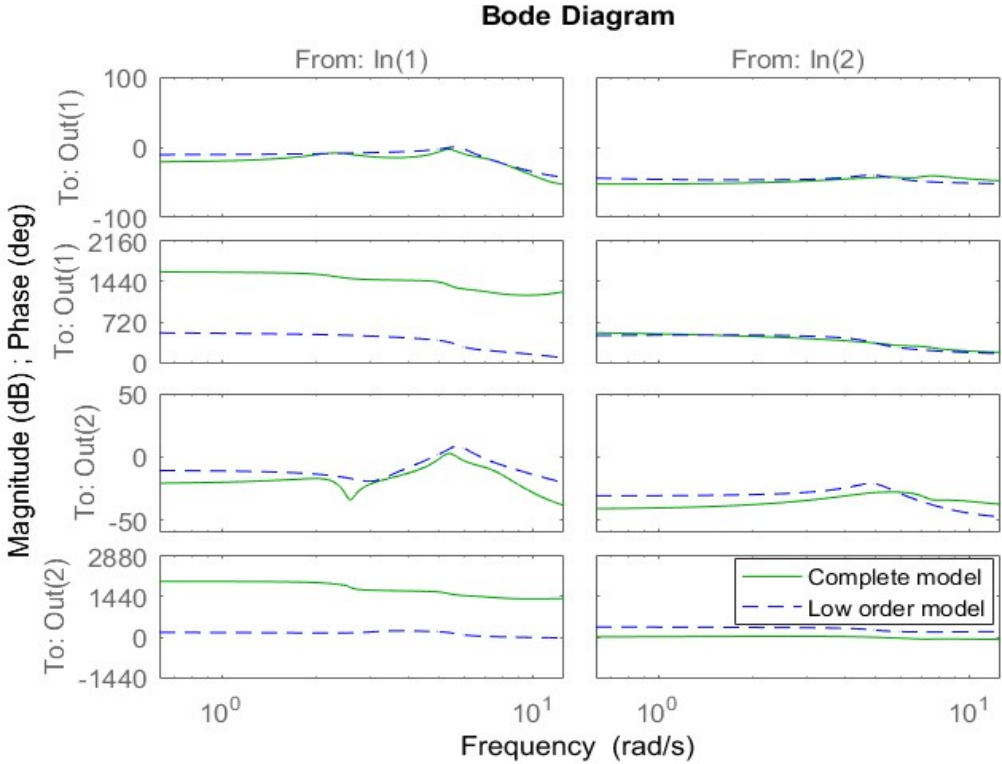
$$Y = \begin{bmatrix} C_{1,nc}^{2 \times (m-2)} & C_{2,nc}^{2 \times (n-2)} & C_c^{2 \times 2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{1,nc} \\ x_{2,nc} \\ x_c \end{bmatrix}$$





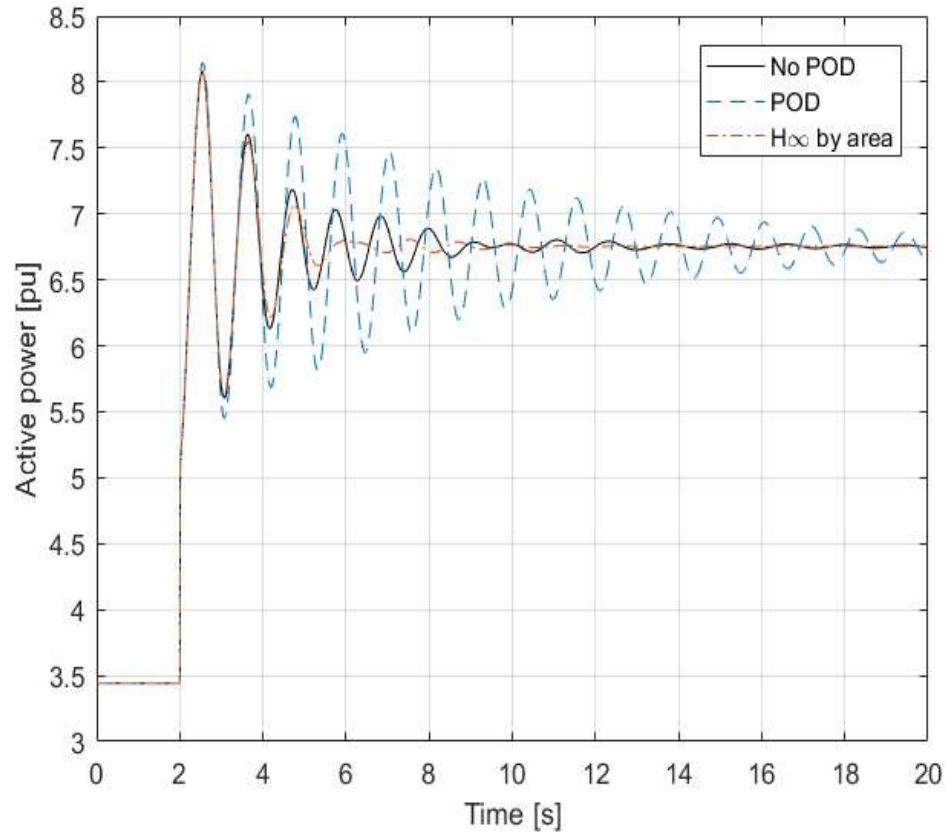
# Modelo Linealizado

Mode	Eigenvalue $\sigma + j\omega$ [p.u]	Frequenc y $f$ [Hz]	Damping $\zeta$ [%]
Inter-area	-0.216±j5.343	0.850	4.04
Area B	-0.803±j7.264	1.156	10.99
Area A	-1.151±j7.311	1.164	15.32
Inter-Area	-1.792±j5.271	0.839	32.20



D.F. Santos, “Amortiguamiento de oscilaciones electromecánicas en un enlace HVDC VSC embebido mediante control suplementario”, Tesis Magíster Ing. Eléctrica, Universidad de los Andes, 2018

# Control Robusto



Inter-area mode	Eigenvalue $\sigma + j\omega$ [p.u]	Frequenc y $f$ [Hz]	Damping $\zeta$ [%]
No POD	$-0.127 \pm j4.475$	0.712	2.84
POD	$-0.379 \pm j4.142$	0.659	9.11
Centralize $H_{\infty}$	$-0.544 \pm j5.134$	0.817	10.54
$H_{\infty}$ by area	$-0.716 \pm j4.831$	0.769	14.66

Gracias

