

Control Discreto con Reguladores Anidados para la Corriente Inyectada a la Red con un Inversor Monofásico y un Filtro LCL

Emilio J. Molina-Martínez¹, Fco. Javier López-Alcolea¹, Alfonso Parreño Torres²,
Ismael Payo², Javier Vázquez¹, Pedro Roncero-Sánchez¹

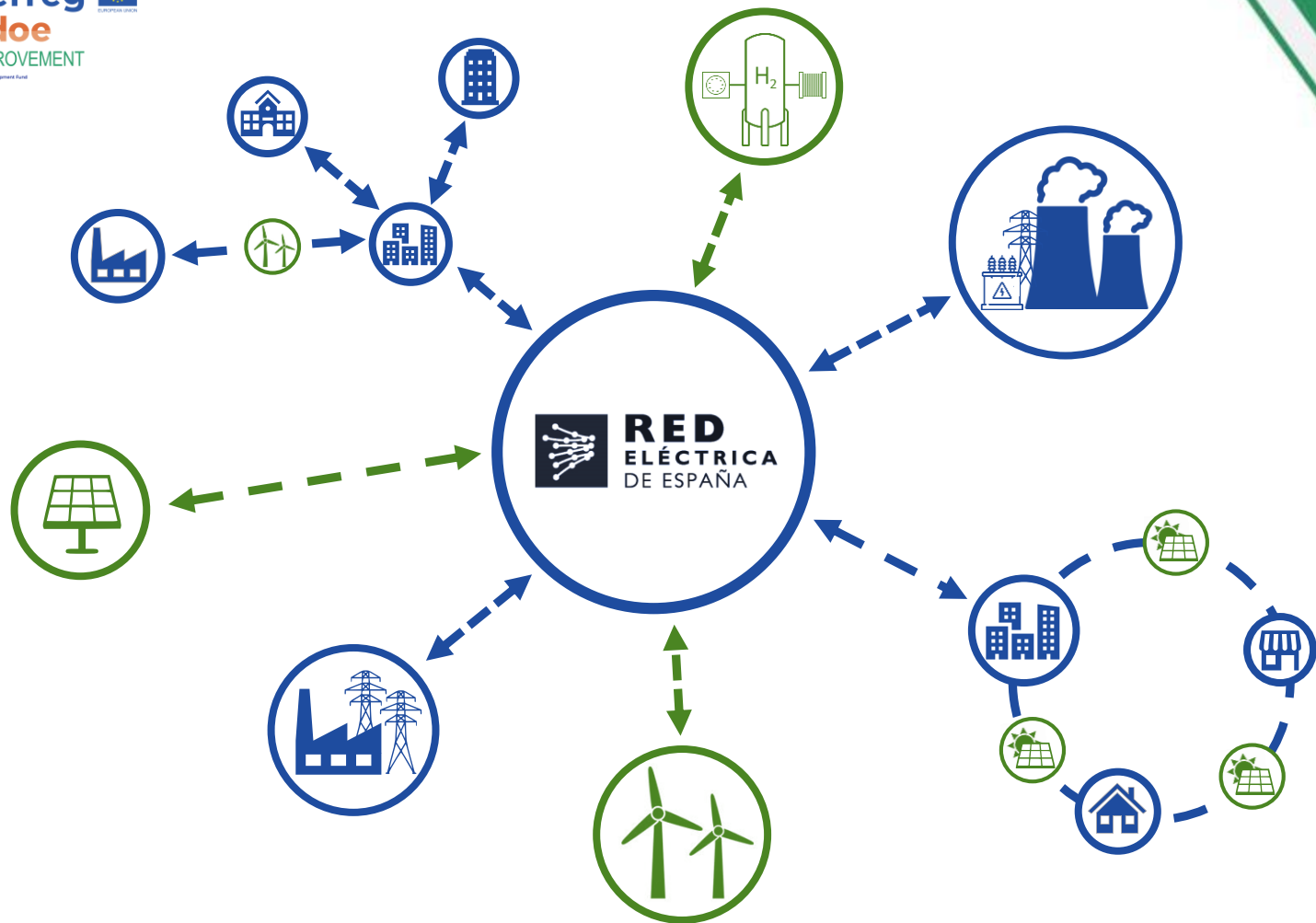
¹Instituto de Investigaciones Energéticas y Aplicaciones Industriales, Universidad de Castilla-La Mancha

²Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Universidad de Castilla-La Mancha



1. Introducción
2. Modelado del sistema
3. Método de control propuesto
4. Resultados simulación / experimentales
5. Conclusiones





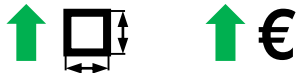
Inversores fuentes de tension (VSI)

- Las conmutaciones pueden dar lugar a problemas:

- Compatibilidad electromagnética
- Calidad de la energía

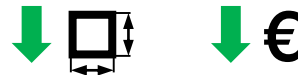
- Filtro L:

- Sencillo
- Baja atenuación (20 dB)
- Gran inductancia



- Filtro LCL:

- Atenuación de 60 dB
- Frecuencia resonancia



Métodos de amortiguamiento de la resonancia

- Pasivos:

- Adicción de componentes pasivos con el condensador

+ Sencillos + Eficiencia

- Activos:

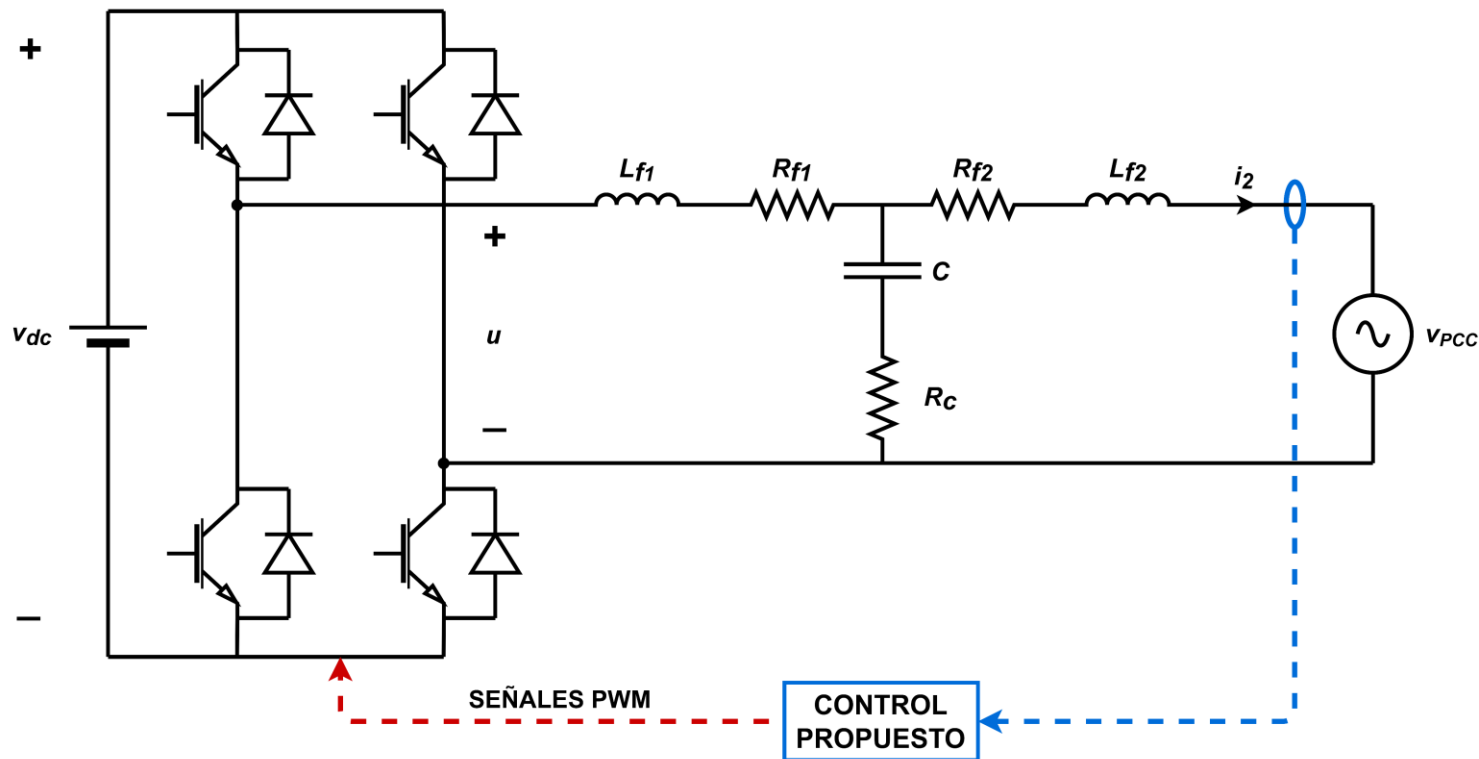
- Utilizan el esquema de control para compensar la resonancia

+ Respuesta + Eficiencia

- Tipos

- Filtro digital en cascada con un regulador PI o PR
- Realimentación de variables de estado

VSI monofásico conectado a red mediante filtro LCL



Planta del sistema

- Función de transferencia del filtro LCL:

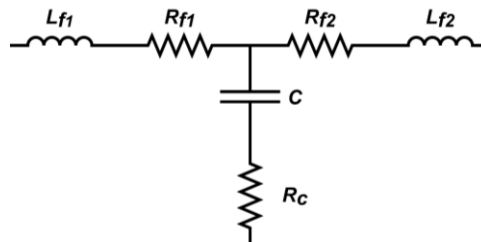
$$P_1(s) = \frac{I_2(s)}{U(s)} = \frac{s\beta_4 + \beta_3}{s^3 + s^2\beta_2 + s\beta_1 + \beta_0}$$

- Retardos PWM / señal de control:

$$P_2(s) = e^{-\tau s} \cdot \frac{s\beta_4 + \beta_3}{s^3 + s^2\beta_2 + s\beta_1 + \beta_0}$$

- Discretización:

$$P_3(z) = \frac{1}{z} \cdot \frac{z^2b_5 + zb_4 + b_3}{z^3 + z^2b_2 + zb_1 + b_0}$$



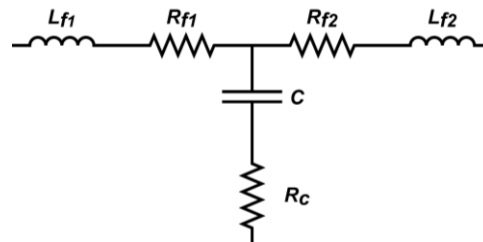
Tensión del PCC

- Perturbación:

$$G_1(s) = \frac{I_2(s)}{V_{PCC}(s)} = \frac{s^2\beta_7 + s\beta_6 + \beta_5}{s^3 + s^2\beta_2 + s\beta_1 + \beta_0}$$

- Discretización:

$$G_3(z) = \frac{z^2b_8 + zb_7 + b_6}{z^3 + z^2b_2 + zb_1 + b_0}$$



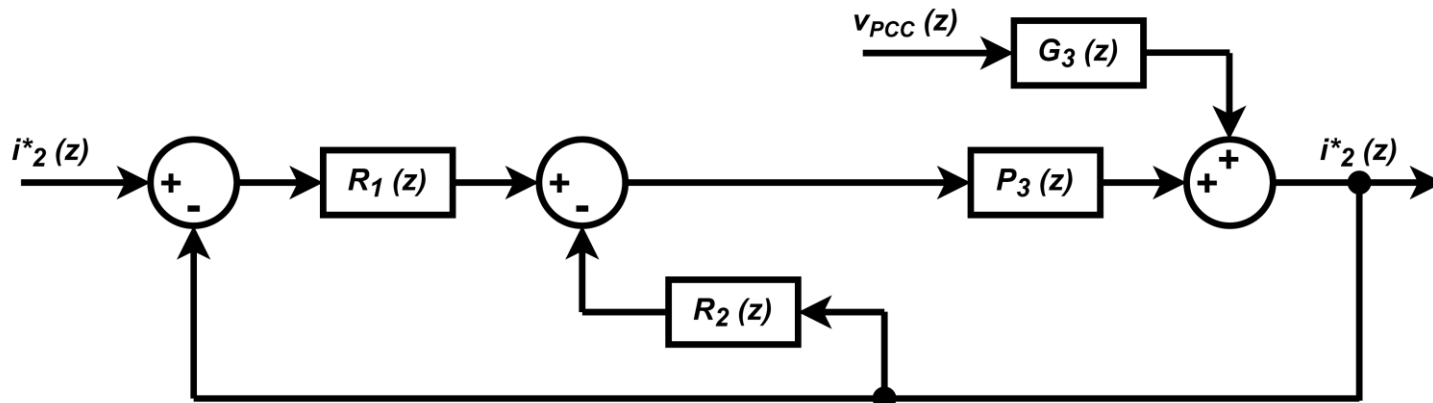
Filtro LCL

- Diseño del filtro LCL
 - Procedimiento propuesto por (Reznik y otros, 2014)*
 - Adaptación para un inversor monofásico con modulación PWM unipolar

$V_{ph} = 230 \text{ V}$		$L_{f1} = 1,7 \text{ mH}$		$10f_0 < f_{res} < \frac{f_{sw}}{2}$
$V_{dc} = 450 \text{ V}$		$L_{f2} = 0,9 \text{ mH}$		$\downarrow$
$S_n = 5 \text{ kVA}$	$\rightarrow$	$C = 18,5 \text{ }\mu\text{F}$		$0,5 < 1,68 < 5 \text{ kHz} \quad \checkmark$
$f_0 = 50 \text{ Hz}$		$R_{f1} = 0,17 \text{ }\Omega$	$\rightarrow$	$L_{f1} + L_{f2} < 0,1L_b$
$f_{sw} = 10 \text{ kHz}$		$R_{f2} = 0,13 \text{ }\Omega$		$\downarrow$
		$R_C = 0,05 \text{ }\Omega$		$0,9 + 1,7 < 3,3 \text{ mH} \quad \checkmark$
		$f_{res} = 1,52 \text{ kHz}$		

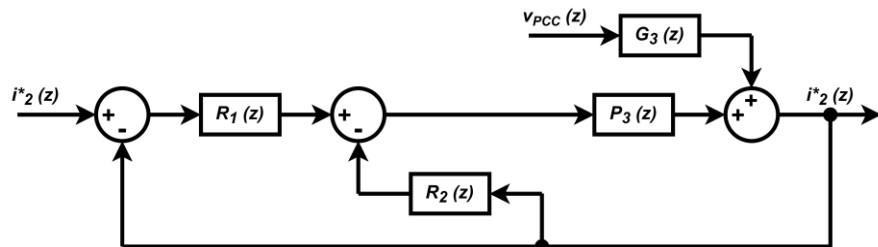
*A. Reznik, M. G. Simões, A. Al-Durra, and S. M. Mueen, "LCL filter design and performance analysis for grid-interconnected systems," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 50, no. 2, pp. 1225-1232, March 2014.

Esquema de control propuesto



Nº parámetros de diseño = Nº polos en lazo cerrado

Esquema de control propuesto



$$H(z) = \frac{P_3(z)R_1(z)}{1 + P_3(z)[R_1(z) + R_2(z)]}$$

$$R_1(z) = R_\omega(z)R_p(z)$$

$$R_\omega(z) = \frac{1}{z^2 + zc_0 + 1} \cdot (z - 1)$$

$$R_p(z) = \frac{R_{p,n}(z)}{R_{p,d}(z)}$$

$$R_2(z) = \frac{R_{2,n}(z)}{R_{2,d}(z)}$$

Esquema de control propuesto

- $R_{p,d}(z) = R_{2,d}(z)$:

$$F(z) = P_{3,d}(z)R_{\omega,d}(z)R_{2,d}(z) + P_{3,n}(z)[R_{p,n}(z)R_{\omega,n}(z) + R_{2,n}(z)R_{\omega,d}(z)]$$

$$N(z) = P_{3,n}(z)R_{\omega,n}(z)R_{p,n}(z)$$

- Diseño de $R_p(z)$ y $R_2(z)$:

$$R_p(z) = \frac{zK_1 + K_0}{z^3 + z^2\rho_2 + z\rho_1 + \rho_0}$$

$$R_2(z) = \frac{z^3K_5 + z^2K_4 + zK_3 + K_2}{z^3 + z^2\rho_2 + z\rho_1 + \rho_0}$$

- Polinomio característico:

$$F(z) = (z^4 + z^3b_2 + z^2b_1 + zb_0)(z^2 + zc_0 + 1) \cdot (z^3 + z^2\rho_2 + z\rho_1 + \rho_0) + (z^2b_5 + zb_4 + b_3) \cdot [(z-1)(zK_1 + K_0) + (z^3K_5 + z^2K_4 + zK_3 + K_2)(z^2 + zc_0 + 1)]$$

$$F(p_i: i \in \{1, 2, \dots, 9\}) = (z - p_1)(z - p_2)(z - p_3)(z - p_4)(z - p_5)(z - p_6)(z - p_7)(z - p_8)(z - p_9) = z^9 + z^8\alpha_8 + z^7\alpha_7 + z^6\alpha_6 + z^5\alpha_5 + z^4\alpha_4 + z^3\alpha_3 + z^2\alpha_2 + z\alpha_1 + \alpha_0$$

Esquema de control propuesto

- Obtención parámetros de diseño:

$$\rho_2 = \alpha_8 - b_2 - c_0$$

$$\mathbf{A}\mathbf{x} = \mathbf{B} \rightarrow \mathbf{x} = \mathbf{A}^{-1} \cdot \mathbf{B}$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & b_5 \\ 1 & b_2 + c_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & b_5 & b_4 + (b_5 c_0) \\ b_2 + c_0 & 1 + b_1 + (b_2 c_0) & 0 & 0 & 0 & b_5 & b_4 + (b_5 c_0) & b_3 + (b_4 c_0) + b_5 \\ 1 + b_1 + (b_2 c_0) & b_0 + (b_1 c_0) + b_2 & 0 & b_5 & b_5 & b_4 + (b_5 c_0) & b_3 + (b_4 c_0) + b_5 & (b_3 c_0) + b_4 \\ b_0 + (b_1 c_0) + b_2 & (b_0 c_0) + b_1 & b_5 & b_4 - b_5 & b_4 + (b_5 c_0) & b_3 + (b_4 c_0) + b_5 & (b_3 c_0) + b_4 & b_3 \\ (b_0 c_0) + b_1 & b_0 & b_4 - b_5 & b_3 - b_4 & b_3 + (b_4 c_0) + b_5 & (b_3 c_0) + b_4 & b_3 & 0 \\ b_0 & 0 & b_3 - b_4 & -b_3 & (b_3 c_0) + b_4 & b_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -b_3 & 0 & b_3 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \rho_0 \\ \rho_1 \\ K_0 \\ K_1 \\ K_2 \\ K_3 \\ K_4 \\ K_5 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \alpha_7 - 1 - b_1 - (b_2 c_0) - \rho_2(b_2 + c_0) \\ \alpha_6 - b_0 - (b_1 c_0) - b_2 - \rho_2(1 + b_1 + (b_2 c_0)) \\ \alpha_5 - (b_0 c_0) - b_1 - \rho_2(b_0 + (b_1 c_0) + b_2) \\ \alpha_4 - b_0 - \rho_2((b_0 c_0) + b_1) - K_2 b_1 \\ \alpha_3 - \rho_2 b_0 \\ \alpha_2 \\ \alpha_1 \\ \alpha_0 \end{bmatrix}$$

Ejemplo de diseño

- Especificaciones:
 - ☐ La componente de continua se debe cancelar
 - ☐ La componente a la frecuencia de red se debe seguir perfectamente
 - ☐ El n° de ceros de lazo cerrado debe ser el mínimo
 - ☐ Es deseable que $H(z)$ tenga un comportamiento paso-banda
 - ☐ No comprometer el Bode y estar lejos del límite de estabilidad

Ejemplo de diseño

- Especificaciones:

- ☒ La componente de continua se debe cancelar
- ☒ La componente a la frecuencia de red se debe seguir perfectamente
- ☐ El n° de ceros de lazo cerrado debe ser el mínimo
- ☐ Es deseable que $H(z)$ tenga un comportamiento paso-banda
- ☐ No comprometer el Bode y estar lejos del límite de estabilidad

$$R_{\omega}(z) = \frac{1}{z^2 + zc_0 + 1} \cdot (z - 1)$$

Ejemplo de diseño

- Especificaciones:

- ☒ La componente de continua se debe cancelar
- ☒ La componente a la frecuencia de red se debe seguir perfectamente
- ☐ El nº de ceros de lazo cerrado debe ser el mínimo
- ☐ Es deseable que $H(z)$ tenga un comportamiento paso-banda
- ☐ No comprometer el Bode y estar lejos del límite de estabilidad

$$P_3(z) = \frac{1}{z} \cdot \frac{z^2 b_5 + z b_4 + b_3}{z^3 + z^2 b_2 + z b_1 + b_0}$$

3,3976 y -0,2794

Ejemplo de diseño

- Especificaciones:

- ☒ La componente de continua se debe cancelar
- ☒ La componente a la frecuencia de red se debe seguir perfectamente
- ☒ El nº de ceros de lazo cerrado debe ser el mínimo
- ☐ Es deseable que $H(z)$ tenga un comportamiento paso-banda
- ☐ No comprometer el Bode y estar lejos del límite de estabilidad

$$P_3(z) = \frac{1}{z} \cdot \frac{z^2 b_5 + z b_4 + b_3}{z^3 + z^2 b_2 + z b_1 + b_0}$$

3,3976 y -0,2794

$$P_1 = -0,2794$$

Ejemplo de diseño

- Especificaciones:

- ☒ La componente de continua se debe cancelar
- ☒ La componente a la frecuencia de red se debe seguir perfectamente
- ☒ El n° de ceros de lazo cerrado debe ser el mínimo
- ☐ Es deseable que $H(z)$ tenga un comportamiento paso-banda
- ☐ No comprometer el Bode y estar lejos del límite de estabilidad

$$|H(z)| = 1$$

$$\angle H(z) = 0$$

$$P_1 = -0,2794$$

Ejemplo de diseño

- Especificaciones:

- ✓ La componente de continua se debe cancelar
- ✓ La componente a la frecuencia de red se debe seguir perfectamente
- ✓ El n° de ceros de lazo cerrado debe ser el mínimo
- ✓ Es deseable que $H(z)$ tenga un comportamiento paso-banda
- No comprometer el Bode y estar lejos del límite de estabilidad

$$|H(z)| = 1$$

$$\angle H(z) = 0$$

$$P_1 = -0,2794$$

$$P_{2,3,4} = 0,966 (\approx 55 \text{ Hz})$$

$$P_{5,6} = 0,483$$

Ejemplo de diseño

- Especificaciones:

- ✓ La componente de continua se debe cancelar
- ✓ La componente a la frecuencia de red se debe seguir perfectamente
- ✓ El n° de ceros de lazo cerrado debe ser el mínimo
- ✓ Es deseable que $H(z)$ tenga un comportamiento paso-banda
- ✓ No comprometer el Bode y estar lejos del límite de estabilidad

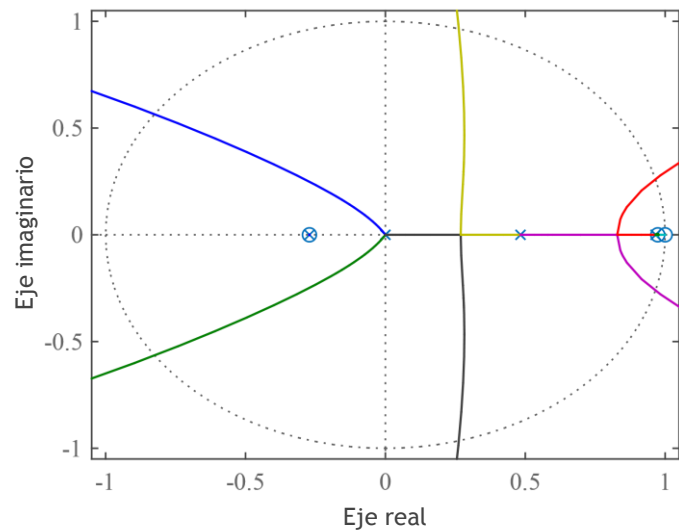
$$P_1 = -0,2794$$

$$P_{2,3,4} = 0,966 (\approx 55 \text{ Hz})$$

$$P_{5,6} = 0,483$$

$$P_{7,8,9} = 0$$

Ejemplo de diseño



$$\rho_0 = -0,129$$

$$\rho_1 = -0,437$$

$$\rho_2 = 0,374$$

$$K_0 = -0,643$$

$$K_1 = 0,661$$

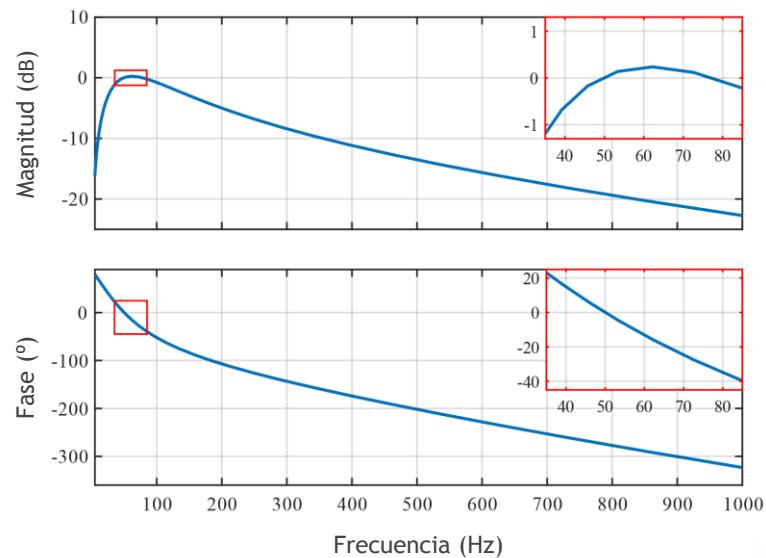
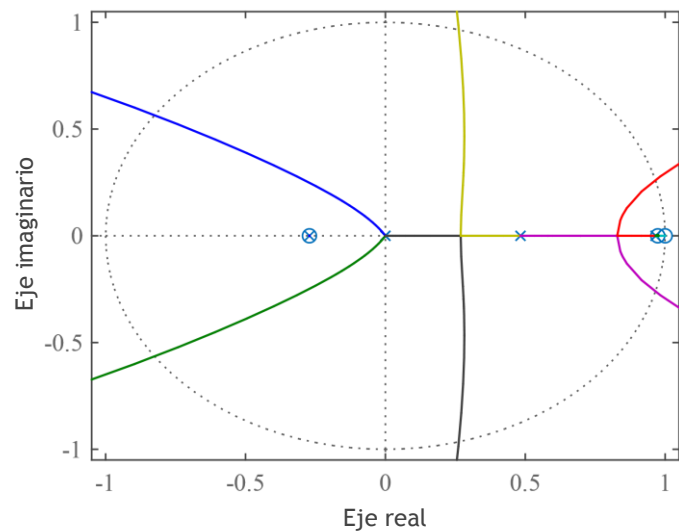
$$K_2 = -0,643$$

$$K_3 = -19,224$$

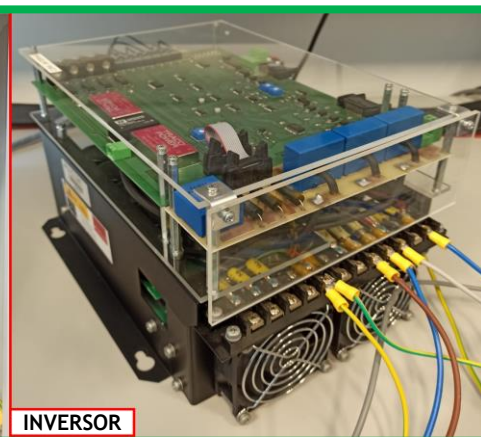
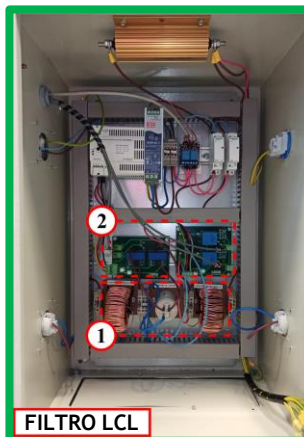
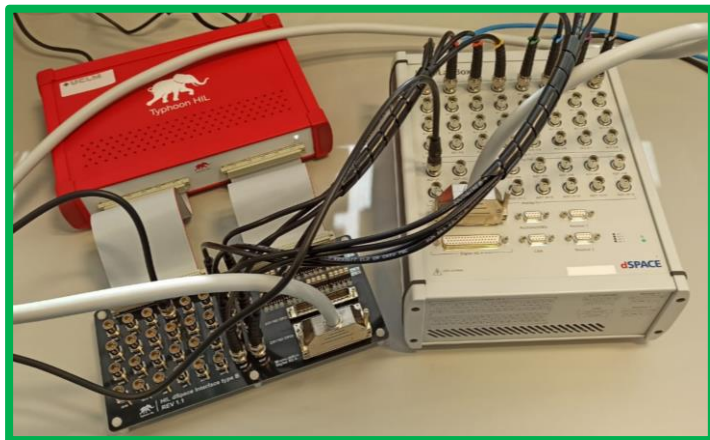
$$K_4 = 47,725$$

$$K_5 = -27,591$$

Ejemplo de diseño

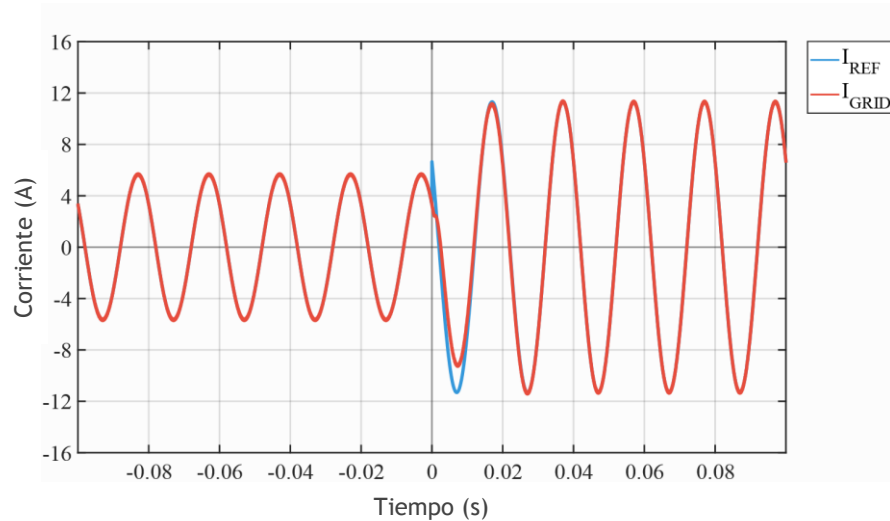


Resultados de simulación y experimentales

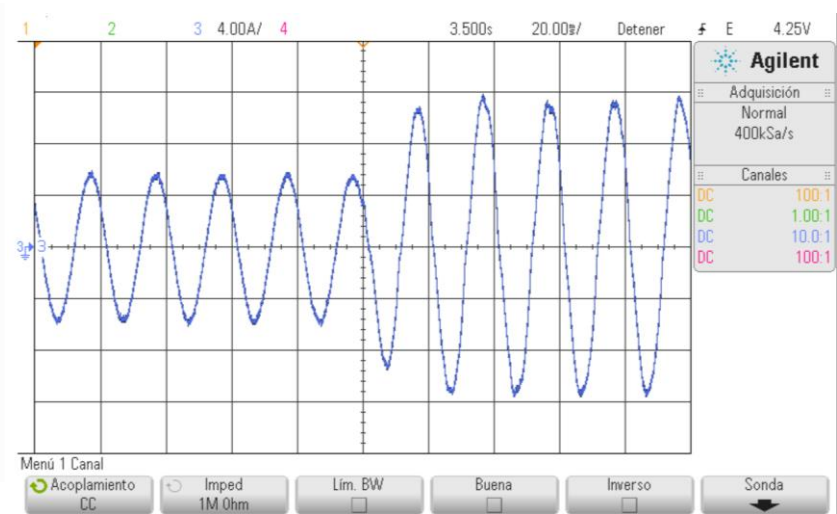


Ensayo 1

- Resultado simulación:

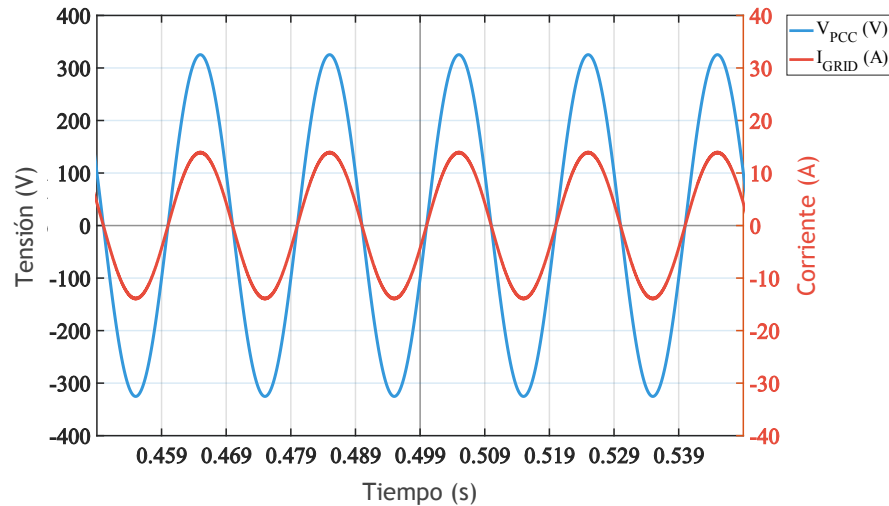


- Resultado experimental:

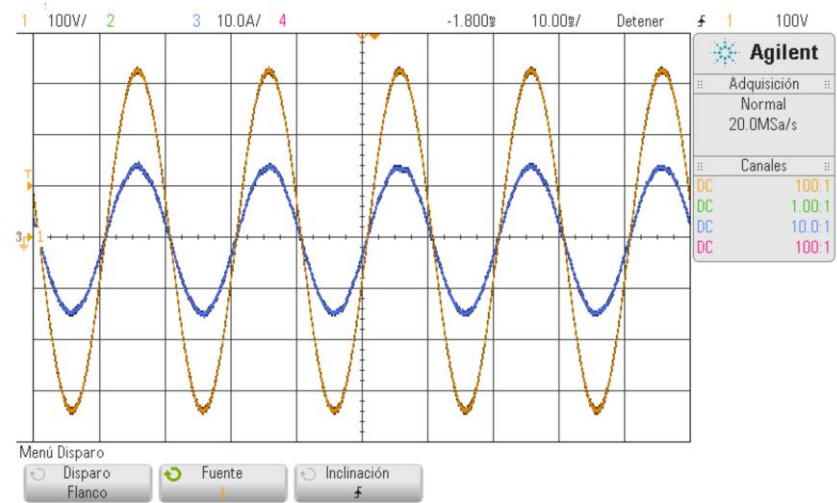


Ensayo 2

- Resultado simulación:



- Resultado experimental:



Conclusiones

- Tanto los resultados de simulación como los experimentales corroboran el buen funcionamiento del control diseñado
- La metodología propuesta permite definir completamente los polos de la función de transferencia en lazo cerrado sin utilizar observadores y midiendo solo la corriente inyectada en la red
- Los parámetros de diseño de los reguladores se obtienen a través de un procedimiento matemático que puede implementarse fácilmente en una plataforma en tiempo real ya que solo implica operaciones reales

¡Muchas gracias por su atención!

