

Incorporación de inteligencia artificial para la coordinación de Smart Grids en sistemas de control maestro–esclavo utilizando MPC como control principal

Axel Gabriel León Morales

2026

Requisito parcial para obtener el título de:
Ingeniero Civil Electricista
Profesora Guía:

Dr. - Ing. Margarita Norambuena (UTFSM)
Comisión:
Prof. Margarita Norambuena (UTFSM)
Prof. Jorge Juliet (UTFSM)

Valparaíso, 2026.



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Incorporación de inteligencia artificial para la coordinación de Smart Grids en sistemas de control maestro-esclavo utilizando MPC como control principal

Nombre del candidato(a): Axel Gabriel León Morales

Carrera / Grado: Ingeniería Civil Eléctrica

Campus: Casa Central Departamento: Ingeniería Civil Eléctrica

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Margarita Norambuena Valdivia, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

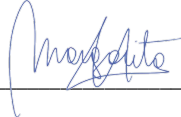
☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (marcar una opción):

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 07.10.2026 Firma: 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 07/10/2026 Firma: 

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

Incorporación de inteligencia artificial para la coordinación de Smart Grids en sistemas de control maestro–esclavo utilizando MPC como control principal

Axel Gabriel León Morales

2026

*“Si alguien puede refutarme y demostrarme que no juzgo
o actúo con rectitud, lo cambiaré con gusto.
Porque busco la verdad, que a nadie perjudicó nunca.
Se perjudica quien persiste en su propio engaño
y en su ignorancia.”*

— Marco Aurelio, Meditaciones, VI, 21.

Agradecimientos

Quiero agradecer a todas las personas que han sido parte de mi desarrollo y que, de distintas maneras, me ayudaron a llegar hasta este momento. Cada conversación, enseñanza, confianza y apoyo dio forma al camino que recorrí. Esta memoria representa años de aprendizaje y esfuerzo, pero también el cariño, la motivación y la guía de quienes me acompañaron en las dificultades y los logros de esta etapa.

A mi familia, por ser mi apoyo más cercano y constante. A mi madre y a mi padre, por los valores que me entregaron, por confiar en mis capacidades y por estar presentes cuando el cansancio o la incertidumbre hacían difícil continuar. A mi hermano menor, por su compañía y por ayudarme a recuperar el ánimo. Gracias por comprender las ausencias, por celebrar cada avance y por recordarme que siempre existió un lugar al cual volver. Mucho de lo que soy y de la forma en que enfrento los desafíos proviene de ustedes.

A mis amigos, tanto a quienes me han acompañado desde hace años como a quienes conocí durante la universidad, quienes permanecieron de manera incondicional, me escucharon y supieron recordarme mi valor y mis razones para seguir luchando. Su presencia hizo más llevaderos los días difíciles y también dio espacio a los momentos de alegría que necesité para completar este proceso.

A mis profesores, por mostrarme el hermoso camino de la ingeniería civil eléctrica y por enseñarme que esta disciplina exige curiosidad, responsabilidad y dedicación. Gracias por motivarme a mejorar, por exigirme hacer las cosas bien y por compartir conocimientos que aportaron a mi formación profesional.

De manera muy especial, agradezco a mi profesora guía, Margarita Norambuena, por su paciencia, atención y dedicación durante el desarrollo de esta memoria. Gracias por revisar cada detalle, orientar mis decisiones y entregarme la confianza necesaria para avanzar. Su simpatía, comprensión y disposición fueron un sostén fundamental en los momentos de mayor dificultad. Valoro profundamente el tiempo que dedicó a este trabajo y la forma en que me enseñó a ser más riguroso, a cuestionar mis resultados y a defender cada decisión con fundamentos.

Finalmente, quiero agradecerme a mí mismo. Por no rendirme cuando las cosas no salieron como esperaba, por volver a levantarme después de cada caída y por seguir intentándolo cuando el resultado parecía lejano. Agradezco la constancia que me permitió convertir los errores en aprendizaje y la voluntad de continuar durante los días más exigentes. Llegar hasta aquí no significa que el camino haya sido perfecto, sino que fui capaz de recorrerlo, aprender de él y seguir adelante. Esta memoria cierra una etapa importante de mi vida y me recuerda todo lo que puedo construir cuando confío en mí y no abandono aquello por lo que he trabajado.

Índice de Contenidos

Índice de Contenidos	I
Índice de Figuras	V
Índice de Tablas	VIII
Nomenclatura	XI
Resumen	1
Abstract	3
1. Introducción	5
1.1. Contexto y motivación	5
1.2. Desajuste del modelo, límites físicos y propuesta	5
1.3. Contribuciones y delimitación	7
2. Objetivos y Alcances	8
2.1. Objetivo general	8
2.2. Objetivos específicos	8
2.3. Alcances	9
3. Marco Teórico	11
3.1. Microrredes y coordinación maestro-esclavo	11
3.2. Convertidores fuente de tensión y filtros de salida	12
3.3. Control predictivo de conjunto finito y MPC modulado	14
3.4. Incertidumbre paramétrica e identificación	15
3.5. Redes neuronales informadas por física	17
3.5.1. La neurona artificial y la función de activación	17
3.5.2. De la neurona a la red informada por física	18
4. Métodos y Desarrollos	20
4.1. Enfoque metodológico y alcance de la implementación	20
4.2. Plataforma de simulación, topología eléctrica y parámetros	21
4.2.1. Topología eléctrica	22
4.2.2. Parámetros de simulación	25
4.3. Representación matemática del sistema	27
4.3.1. Convención de notación	27
4.3.2. Transformación de Clarke	29

4.3.3.	Estados de conmutación del inversor	29
4.3.4.	Extrapolación sinusoidal en coordenadas $\alpha\beta$	29
4.4.	Escenario 1, desarrollo progresivo de la arquitectura maestro-esclavo . . .	30
4.4.1.	Estructura del bloque de control y selección de modo	30
4.4.2.	Sincronización y detección de secuencia positiva	31
4.4.3.	Potencias filtradas y referencias de potencia	32
4.4.4.	Modelo discreto y predicción	32
4.4.5.	Referencias por modo de operación	33
4.4.6.	Función de costo y selección del estado de conmutación	34
4.4.7.	Elección de los pesos de la función de costo	35
4.4.8.	Implementación maestro-esclavo y operación dual	36
4.4.9.	Síntesis de la implementación del Escenario 1	43
4.5.	Escenario 2, control por modulación, amortiguamiento activo y segui- miento de la corriente de salida	46
4.5.1.	Del conjunto finito al MPC modulado	46
4.5.2.	Amortiguamiento activo por resistencia virtual	51
4.5.3.	Filtrado <i>washout</i> del amortiguamiento	52
4.5.4.	Lazo de tensión <i>grid-forming</i> en modo isla	53
4.5.5.	Seguimiento de la corriente de salida en modo conectado a la red . .	55
4.5.6.	Caso base nominal del Escenario 2	56
4.6.	Formulación del ajuste paramétrico informado por física	59
4.6.1.	Familias de PINN y formulación supervisada del problema inverso .	59
4.6.2.	Modelo discreto, reescalado y espacio de perturbación	61
4.6.3.	Vector de entrada, arquitectura y tamaño de la red neuronal	64
4.6.4.	De la salida de la PINN al parámetro efectivo	68
4.6.5.	Secuencia completa, del conjunto de datos al predictor	70
4.6.6.	Función de pérdida y configuración de entrenamiento	71
4.6.7.	Campaña de datos y envolvente de validez	74
4.7.	Implementación del <i>param-scaling</i> en el controlador maestro	78
4.7.1.	Integración en línea en el C-Script	78
4.7.2.	Persistencia y presupuesto computacional	79
4.8.	Criterios de validación y alcance de la implementación	80
5.	Resultados	82
5.1.	Referencias analíticas de estabilidad y límite de actuación ante desajuste del modelo	83
5.1.1.	Planta y control en tiempo discreto	83
5.1.2.	Construcción del lazo cerrado y señales exógenas	84
5.1.3.	Criterio de estabilidad y límite analítico del lazo de corriente reducido	84
5.1.4.	Nivel de perturbación máximo según la disponibilidad de tensión . .	88
5.1.5.	Límites de tensión de las dos actuaciones	89
5.1.6.	Rango de entrenamiento frente a rango de compensación efectiva . .	92
5.2.	Identificación paramétrica en línea y mejora de la predicción	93
5.3.	Desempeño en lazo cerrado y límites físicos de actuación	95
5.4.	Caracterización sistemática por grupos de perturbación	96
5.4.1.	Métrica de régimen y clasificación	96
5.4.2.	Grupos de perturbación y nivel K	96
5.4.3.	Alcance de la comparación	97

5.5. Escenario 1, FCS-MPC	99
5.5.1. Diseño de la campaña y resolución del barrido	99
5.5.2. Caso nominal y clasificación por régimen	99
5.5.3. Grupo G1, barrido axial de la inductancia	102
5.5.4. Grupo G2, resonancia desplazada con impedancia conservada	104
5.5.5. Grupo G3, barrido axial de la capacitancia	108
5.5.6. Grupo G4, resonancia fija con impedancia variable	110
5.5.7. Grupo G5, escenarios no correlacionados	114
5.5.8. Calidad de la identificación	114
5.5.9. Contraste del límite de tensión con la campaña	118
5.6. Escenario 2, MPC modulado	118
5.6.1. Diseño de la campaña y resolución del barrido	118
5.6.2. Caso nominal y clasificación por régimen	119
5.6.3. Grupo G1, barrido axial de la inductancia	122
5.6.4. Grupo G2, resonancia desplazada con impedancia conservada	125
5.6.5. Grupo G3, barrido axial de la capacitancia	128
5.6.6. Grupo G4, resonancia fija con impedancia variable	130
5.6.7. Grupo G5, escenarios no correlacionados	134
5.6.8. Identificación paramétrica	134
5.6.9. Contraste del límite de tensión con la campaña	138
5.6.10. Contraste entre las familias acopladas	139
5.6.11. Verificación con ventana larga	139
5.7. Balance energético y corriente del enlace de continua	142
5.7.1. Formulación y reconstrucción de la corriente del enlace	142
5.7.2. Cierre del balance en régimen sano	144
5.7.3. G4, frontera asociada al límite de tensión	145
5.7.4. G2, la rama capacitiva se convierte en la carga dominante	146
5.7.5. Síntesis de la evidencia energética	152
5.8. Evaluación del sistema ante variaciones de consigna de potencia	153
5.8.1. Diseño del ensayo	153
5.8.2. Capacidad efectiva de despacho y seguimiento de las consignas	155
5.8.3. Flujo de potencia en la red externa	157
5.8.4. Robustez de la identificación sobre el despacho	160
5.8.5. Desempeño de la corrección a lo largo del despacho	162
5.8.6. Cierre del sistema frente al desajuste	165
5.8.7. Síntesis y alcance	166
5.9. Ensayo de retirada del término físico de la pérdida	166
5.9.1. Diseño y repetición emparejada	167
5.9.2. Identificación y consistencia física	168
5.9.3. Comparación en lazo cerrado	170
5.9.4. Interpretación del ensayo	172
5.9.5. Seguimiento de parámetros efectivos	172
5.9.6. Habilitación condicionada de la corrección	174
5.10. Escenario 3, identificación paramétrica distribuida en las tres unidades	176
5.10.1. Diseño factorial y métrica	177
5.10.2. Identificación propia y sensibilidad cruzada	178
5.10.3. Efecto sobre el seguimiento	179
5.10.4. Alcance de la extensión	186

6.	Conclusiones y Recomendaciones	187
6.1.	La configuración sobre la que se responde	187
6.2.	Cumplimiento de los objetivos, uno a uno	188
6.3.	Identificación paramétrica y efecto en lazo cerrado	189
6.4.	Los límites del método y las dos fronteras físicas	190
6.5.	Validación complementaria	191
6.6.	Contribución central	191
6.7.	Recomendaciones y trabajo futuro	192
A.	Configuración reproducible y trazabilidad	194
A.1.	Artefactos y alcance de la reproducción	194
A.2.	Configuración y conteos vigentes	195
A.3.	Tabla maestra de fronteras	196
A.4.	Entrenamiento e inferencia reproducible	197
A.4.1.	Artefactos conservados del entrenamiento	197
A.5.	Correspondencia con el C-Script	198
A.6.	Canal auxiliar de R_{fc}	199
A.6.1.	Asimetría de observabilidad entre C_f y R_{fc}	199
A.6.2.	La resistencia serie del inductor	200
A.6.3.	Registro histórico del canal	200
A.7.	Ensayos auxiliares conservados	200
A.7.1.	Bloques de apoyo desactivados	200
A.7.2.	Sensibilidad a los pesos del FCS-MPC	201
A.7.3.	Resistencia virtual y ventanas extendidas	201
A.7.4.	Alcance del recorte anti- <i>windup</i> del integrador de tensión	201
A.7.5.	Transmisión del filtro <i>washout</i> en las dos frecuencias de interés	202
A.7.6.	Elección del coeficiente de amortiguamiento	202
A.8.	Bandas de perturbación realista de los componentes del filtro	205
A.9.	Cálculo del nivel crítico por el criterio de tensión	207
A.10.	Deducción del MPC de conjunto continuo y de la proyección de actuación	208
A.11.	Verificación del evaluador y tiempo de inferencia	209
B.	Figuras complementarias de resultados	212
B.1.	Casos nominales en modo conectado a la red	212
B.2.	Formas de onda de máxima mejora	212
B.2.1.	Escenario 1, FCS-MPC	212
B.2.2.	Escenario 2, MPC modulado	212
B.3.	Utilización de la tensión disponible	212
B.4.	Casos individuales de G4 en modo conectado a la red	212
B.5.	Escenarios no correlacionados del grupo G5	212
B.6.	Error por tramo en el ensayo de consignas	213
	Bibliografía	222

Índice de Figuras

3.1.	Jerarquía funcional de la microrred maestro–esclavo, capa primaria de selección de modo, capa de control predictivo del maestro y de los esclavos, y planta en PLECS.	12
3.2.	Conjunto de tensión alcanzable del VSI de dos niveles con $V_{dc} = 800$ V. .	13
3.3.	De la neurona biológica a la neurona artificial, y funciones de activación.	18
4.1.	Topología general del sistema maestro–esclavo implementado en PLECS, convertidor maestro con filtro LC, dos convertidores esclavos idénticos con filtro LCL conectados en paralelo al mismo PCC, carga y red equivalente externa. Los fasores espaciales se escriben en negrita y las magnitudes por fase, en cursiva.	23
4.2.	Modelos LCL con línea y LC reducido del esclavo.	24
4.3.	Arquitectura de control del Escenario 1.	44
4.4.	Diagrama de bloques del Escenario 1.	45
4.5.	Arquitectura de control del Escenario 2.	50
4.6.	Diagrama de bloques del Escenario 2.	58
4.7.	Las dos familias de red informada por física para el problema inverso. . .	60
4.8.	Arquitectura y función de pérdida de la PINN.	65
4.9.	Reparto de los conjuntos en el plano de los dos factores del filtro.	75
4.10.	Conjunto de perturbación en el plano ($\ln K_{Lf}$, $\ln K_{Cf}$).	77
4.11.	Integración de la inferencia PINN con el predictor del MPC.	79
5.1.	Indicadores de pérdida de seguimiento en modo isla.	91
5.2.	Escenario 1, caso nominal en modo isla.	100
5.3.	Escenario 1, reparto de regímenes por modo de operación.	102
5.4.	Escenario 1, grupo G1, variante directa, modo isla.	103
5.5.	Escenario 1, grupo G1, variante directa, modo conectado a la red.	103
5.6.	Escenario 1, grupo G2, variante directa, modo isla.	105
5.7.	Escenario 1, grupo G2, variante directa, modo conectado a la red.	106
5.8.	Escenario 1, grupo G2, variante directa, forma de onda en modo isla, nivel de máxima mejora.	107
5.9.	Escenario 1, grupo G3, variante directa, modo isla.	108
5.10.	Escenario 1, grupo G3, variante directa, modo conectado a la red.	109
5.11.	Escenario 1, grupo G4, variante directa, modo isla.	110
5.12.	Escenario 1, grupo G4, variante directa, modo conectado a la red.	111
5.13.	Escenario 1, grupo G4, variante directa, forma de onda en modo conectado a la red.	112
5.14.	Escenario 1, grupo G4, variante directa, forma de onda en modo isla, nivel de máxima mejora.	113

5.15.	Escenario 1, factor de inductancia identificado frente al aplicado.	116
5.16.	Escenario 1, factor de capacitancia identificado frente al aplicado.	117
5.17.	Caso nominal en modo isla.	120
5.18.	Reparto de regímenes por modo de operación, umbral de $\pm 5\%$ con piso de sensibilidad.	122
5.19.	Grupo G1, barrido axial de L_f , variante directa, modo isla.	123
5.20.	Grupo G1, barrido axial de L_f , variante directa, modo conectado a la red.	123
5.21.	Grupo G2, impedancia característica constante, variante directa, modo isla.	125
5.22.	Grupo G2, impedancia característica constante, variante directa, modo conectado a la red.	126
5.23.	Grupo G2, variante directa, forma de onda en modo isla, nivel de máxima mejora.	127
5.24.	Grupo G3, barrido axial de C_f , variante directa, modo isla.	128
5.25.	Grupo G3, barrido axial de C_f , variante directa, modo conectado a la red.	129
5.26.	Grupo G4, resonancia fija, variante directa, modo isla.	130
5.27.	Grupo G4, resonancia fija, variante directa, modo conectado a la red. . .	131
5.28.	Grupo G4, variante directa, forma de onda en modo conectado a la red. .	132
5.29.	Grupo G4, variante directa, forma de onda en modo isla, nivel de máxima mejora.	133
5.30.	Factor de inductancia identificado frente al aplicado, barrido axial.	136
5.31.	Factor de capacitancia identificado frente al aplicado, barrido axial. . . .	137
5.32.	Instante de colapso frente al nivel de perturbación en registros de quince segundos, modo isla.	140
5.33.	Error de régimen medido a quince segundos frente al nivel de perturbación, modo isla.	141
5.34.	Escenario 1, grupo G4, términos del balance energético en modo isla frente al nivel de perturbación.	145
5.35.	Escenario 2, grupo G4, términos del balance energético en modo isla. . .	146
5.36.	Escenario 1, grupo G2, términos del balance energético en modo isla frente al nivel de perturbación.	147
5.37.	Escenario 2, grupo G2, términos del balance energético en modo isla. . .	148
5.38.	Escenario 1, grupo G2, razón entre la potencia disipada en la rama capacitiva y la que llega a la carga, modo isla. La línea de puntos marca la paridad.	150
5.39.	Escenario 2, grupo G2, razón entre la potencia disipada en la rama capacitiva y la entregada a la carga, modo isla.	151
5.40.	Escenario 1, seguimiento de las consignas activa y reactiva del maestro. .	156
5.41.	Escenario 2, seguimiento de las consignas activa y reactiva del maestro. .	156
5.42.	Tensión y corriente de red en los seis niveles de la serie activa.	158
5.43.	Separación de los canales activo y reactivo en la entrada de la red.	159
5.44.	Desviación de los factores identificados respecto de la estimación en $(P) = 1$ pu.	160
5.45.	Clave de lectura de los mapas de mejora.	162
5.46.	Escenario 1, mapa de mejora sobre el barrido de consignas.	163
5.47.	Escenario 2, mapa de mejora sobre el barrido de consignas.	163
5.48.	Clases de desempeño según el nivel de consigna.	164
5.49.	Corriente del maestro en cuatro condiciones de desajuste.	165
5.50.	Validación de las cinco parejas por modo.	168

5.51.	Pérdidas y pesos adaptativos del lbPINN seleccionado por validación en cada modo. Cada columna corresponde a un modo distinto.	169
5.52.	RMSE frente a los factores del filtro, Escenario 2 conectado a la red. . . .	171
5.53.	RMSE frente a los factores del filtro, Escenario 2 en isla.	171
5.54.	Escalones y rampas de incremento del 20 % en red.	173
5.55.	Escalones y rampas de incremento del 20 % en isla.	174
5.56.	RMSE con tres políticas de aplicación de los factores del lbPINN. Cada grupo es una corrida independiente y las barras condicionadas sin relleno indican que la regla no se activó.	175
5.57.	Índice conjunto según la ubicación de la perturbación.	180
5.58.	Escenario 3, formas de onda de G2 en modo isla.	182
5.59.	Escenario 3, formas de onda de G2 en modo conectado a la red.	183
5.60.	Escenario 3, formas de onda de G4 en modo isla.	184
5.61.	Escenario 3, formas de onda de G4 en modo conectado a la red.	185
A.1.	Recorrido del amortiguamiento. En el eje izquierdo, en naranja, el <i>peak</i> resonante M_r de la ecuación (A.6). En el eje derecho, en azul, la perturbación de la fundamental Δv_1 de la ecuación (A.7), normalizada por la tensión nominal. La línea de puntos marca el valor adoptado y la de trazo y punto el amortiguamiento del umbral $1/\sqrt{2}$ de desaparición del máximo resonante, no del amortiguamiento crítico.	204
B.1.	Formas de onda nominales en modo conectado a la red.	214
B.2.	Escenario 1, formas de onda representativas de los grupos axiales G1 y G3.215	
B.3.	Escenario 1, formas de onda de máxima mejora de los grupos G5 y G2. La del grupo G4 se presenta en el cuerpo, Figura 5.13.	216
B.4.	Escenario 2, formas de onda representativas de los grupos axiales G1 y G3.217	
B.5.	Escenario 2, formas de onda de máxima mejora de los grupos G5 y G2. La del grupo G4 se presenta en el cuerpo, Figura 5.28.	218
B.6.	Diagnósticos complementarios del límite de tensión en los dos escenarios.	219
B.7.	Grupo G4, corriente de salida en modo conectado a la red.	219
B.8.	Grupo G5, dispersión frente a la severidad $\sigma(\mathbf{K})$ en los dos escenarios.	220
B.9.	Error por tramo en la condición nominal del ensayo de consignas, obtenido con la misma escalera de potencia aplicada en ambos modos de operación.	221

Índice de Tablas

3.1.	Diferencias conceptuales entre las dos estrategias predictivas.	15
3.2.	Criterio metodológico para la selección del estimador paramétrico	16
4.1.	Parámetros de la etapa actual, maestro, planta y configuración del C-Script.	25
4.2.	Convención de notación de los Capítulos 4 y 5.	28
4.3.	Parámetros eléctricos activos del Escenario 1.	37
4.4.	Pesos FCS-MPC, sincronización y parámetros lógicos del Escenario 1. . .	37
4.5.	Consignas de potencia del Escenario 1 (cuota del requerimiento del PCC).	38
4.6.	Parámetros del caso base nominal del Escenario 2 y criterio de selección, agrupados por bloque funcional.	57
4.7.	Comparación de las dos familias frente a un identificador dentro del lazo.	60
4.8.	Componentes del vector de entrada de la PINN, en su orden de construcción.	66
4.9.	Estadísticos de normalización de componentes representativas, modo co- nectado a la red.	67
4.10.	Dimensiones y recuento de parámetros entrenables de cada red.	68
4.11.	Escalas físicas de la pérdida de física en las cuatro redes desplegadas. . .	72
4.12.	Diseño del conjunto de perturbación en el plano ($\ln K_{Lf}$, $\ln K_{Cf}$). Cada grupo es una recta por el origen recorrida en dos sentidos.	76
4.13.	Efecto de cada dirección sobre los descriptores dinámicos del filtro, para la variante directa y relativo al caso nominal. El amortiguamiento supone R_v constante en el valor dimensionado para el filtro nominal.	76
4.14.	Presupuesto por inferencia de las dos redes del maestro.	80
5.1.	Balance de potencia del Escenario 1 en el caso nominal.	82
5.2.	Polo del lazo reducido y error medido en la rama subnominal de G1, Escenario 2 en modo conectado a la red.	86
5.3.	Nivel crítico predicho por el criterio de tensión frente a la frontera obser- vada, modo isla.	90
5.4.	Cobertura de compensación efectiva, definida como la fracción de niveles simulados clasificados como rescate. G1 y G3 contienen 99 niveles por modo, G2 y G4 contienen 96, y G5 contiene 100.	93
5.5.	Error logarítmico de identificación y equivalencia multiplicativa, en tanto por ciento.	94
5.6.	Mínimo del error de régimen de cada curva y nivel en que se alcanza. Cada mínimo es el piso de error de su configuración, no un término de comparación entre ambas, porque se alcanzan en niveles distintos.	98
5.7.	Escenario 1. Mediana del error de régimen y clasificación por grupo y modo, con umbral de $\pm 5\%$ y piso de sensibilidad.	101

5.8.	Escenario 1. Error de identificación $ \ln(\rho/K) $ y sesgo ρ/K por grupo y modo.	114
5.9.	Escenario 2. Mediana del error de régimen y clasificación por grupo y modo, con umbral de $\pm 5\%$ y piso de sensibilidad.	121
5.10.	Escenario 2. Error de identificación $ \ln(\rho/K) $ y sesgo ρ/K por grupo y modo.	134
5.11.	Escenario 2. Frontera de colapso a quince segundos y estabilidad de la mejora, modo isla.	139
5.12.	Residuo del balance según el punto en que se evalúa la potencia de salida, modo isla.	144
5.13.	Verificación de la ley de disipación de la rama capacitiva. Grupo G2, modo isla, Escenario 1, sin corrección.	149
5.14.	Traducción del nivel de perturbación de G2 a valores físicos del filtro. La impedancia característica se conserva por construcción del grupo.	149
5.15.	Balance energético en modo isla.	152
5.16.	Reparto nominal y capacidad de las unidades.	154
5.17.	Condiciones físicas empleadas en el barrido de consignas.	155
5.18.	Métricas de seguimiento del maestro en los dos escenarios.	157
5.19.	Potencia en la entrada de la red durante el barrido principal.	157
5.20.	Potencias de red en las series cruzadas.	159
5.21.	Recorrido de la identificación sobre una planta constante.	160
5.22.	Factores identificados durante la serie activa nominal.	161
5.23.	Ablación de los lazos externos. Recorrido de ρ_{Lf} a lo largo del despacho.	161
5.24.	Mejora mediana según el nivel de consigna.	164
5.25.	Resumen de la corrección dentro de la envolvente física.	165
5.26.	RMSE de corriente en el cierre del sistema.	166
5.27.	Validación y residuo físico retenido. Media y desviación estándar entre cinco semillas.	167
5.28.	Identificación retenida por semilla. Las dos columnas de error están expresadas en porcentaje logarítmico.	168
5.29.	RMSE en lazo cerrado y diferencia emparejada. El intervalo corresponde a sin física menos completa.	170
5.30.	Seguimiento de escalones con lbPINN, respuesta del factor filtrado.	173
5.31.	RMSE final, fracción habilitada en régimen y cambios de habilitación posteriores a 0.4 s.	176
5.32.	RMSE dimensional del ensayo factorial del Escenario 3.	178
5.33.	Factores identificados en los casos nominal y perturbado.	178
5.34.	Error propio y respuesta cruzada del ensayo aislado.	179
6.1.	Matriz de cumplimiento de los objetivos específicos.	188
A.1.	Paquetes de evidencia conservados para la reproducción.	194
A.2.	Parámetros congelados de la comparación.	195
A.3.	Conteos y ventanas de los conjuntos finales.	195
A.4.	Ejecuciones de la campaña de consignas retenidas como evidencia.	196
A.5.	Fronteras registradas y criterio empleado en cada campaña.	197
A.6.	Configuración final del entrenamiento paramétrico.	198
A.7.	Archivos principales del flujo fuera de línea.	198

A.8.	Trazabilidad entre implementación y formulación.	199
A.9.	Barrido histórico de R_{fc} , fuera del análisis principal.	200
A.10.	Sensibilidad del control base a los pesos del costo.	201
A.11.	Recorrido analítico del amortiguamiento sobre el filtro LC del maestro. M_r es el <i>peak</i> resonante de la ecuación (A.6) y Δv_1 la perturbación de la fundamental de la ecuación (A.7). El sobrepaso corresponde a la respuesta al escalón del mismo lazo de segundo orden.	203
A.12.	Mecanismos de perturbación de los componentes reactivos, magnitud típica, escala de tiempo y reversibilidad. Los porcentajes son relativos al valor nominal.	206
A.13.	Identificación entre inicializaciones sobre el conjunto de validación.	209
A.14.	Tiempo de inferencia de la PINN del Escenario 2 en computador.	210
A.15.	Tiempo de cómputo del controlador maestro medido dentro de PLECS, caso nominal.	210

Nomenclatura

Símbolo	Significado y unidad
Convenios de escritura	
x	Fasor espacial en coordenadas $\alpha\beta$, de componentes x_α y x_β
X	Valor RMS
x_{pk}	Valor máximo instantáneo de una magnitud sinusoidal
$\hat{x}$	Magnitud calculada por un modelo y no medida, sea predicción del modelo discreto o estimación de la PINN. Único acento del documento
x^{med}	Magnitud medida y muestreada
x^{ext}	Magnitud extrapolada y tratada como perturbación externa
x^{ref}	Referencia o consigna que el control debe seguir
u^*	Tensión óptima, solución del problema de minimización del costo
x^{lp}, x^{hp}	Componente lenta y componente rápida tras el filtrado
x^{eff}	Valor efectivo del parámetro tras el reescalado de la PINN
$\odot$	Producto componente a componente entre dos vectores del mismo tamaño
$\oslash$	División componente a componente entre dos vectores del mismo tamaño
$x^{m\acute{a}x}$	Tope superior impuesto por la capacidad física de la unidad, su límite de corriente o la potencia aparente que de él se deriva
m, s, r	Índices de maestro, esclavo genérico y estado de conmutación candidato
Variables eléctricas y del modelo	
a_i, b_i, b_c	Coefficientes del predictor discreto del filtro
a_{real}, a_{imag}	Coefficientes de la extrapolación sinusoidal en $\alpha\beta$
C_f	Capacitancia del filtro LC del maestro, F
f_c	Frecuencia de la portadora triangular del modulador, Hz
f_s	Frecuencia de muestreo y actualización del controlador, Hz
$f_{sw,eff}$	Frecuencia media de conmutación por semiconductor, Hz
$H(j\omega)$	Respuesta en frecuencia del filtro <i>washout</i> del amortiguamiento activo
i_c	Corriente de la rama capacitiva del filtro, $i_c = i_f - i_o$, A
i_f	Corriente del inductor del lado inversor, A
i_o	Corriente de salida hacia la línea o el PCC, A
K	Nivel de perturbación paramétrica del barrido, adimensional
K_{Lf}, K_{Cf}	Factores de perturbación física del filtro aplicados a la planta, adimensionales

Símbolo	Significado y unidad
K_{Rfc}	Factor de perturbación de la rama capacitiva, adimensional
L_f	Inductancia del filtro del maestro, H
L_{out}	Inductancia del lado de red del filtro LCL del esclavo, H
m_a, m_b, m_c	Índices de modulación normalizados en $[-1, 1]$
N_{slaves}	Número de convertidores esclavos
P, Q	Potencias activa y reactiva trifásicas, W y VAR
R_f	Resistencia serie al inductor del filtro, Ω
R_{fc}	Resistencia serie total de la rama capacitiva, Ω
R_v	Resistencia virtual de amortiguamiento activo, Ω
S_a, S_b, S_c	Estados o pulsos de conmutación en $\{0, 1\}$
T_s	Periodo de muestreo y actualización del control, s
$\mathbf{u}$	Vector de tensión promedio aplicada por el convertidor, V
V_{dc}	Tensión del bus de continua, V
$V_{\max}$	Límite de tensión sintetizable por el convertidor, V
$\mathbf{v}_C$	Tensión del condensador del filtro, V
$\mathbf{v}_c$	Tensión de la rama capacitiva completa, $\mathbf{v}_c = \mathbf{v}_C + R_{fc}\mathbf{i}_c$, V
v_{cota}	Cota conservadora de amplitud empleada para convertir el límite de corriente del esclavo en un límite de potencia, V
v_{nom}	Valor máximo instantáneo fase-neutro de referencia, V
$\mathbf{v}_{PCC}$	Tensión del punto de acoplamiento común, V
Y_C	Admitancia de la rama capacitiva del filtro, S
Y_m	Admitancia aparente vista por el maestro, incluidos el reparto y la línea, S
Z_0	Impedancia característica del filtro, $\sqrt{L_f/C_f}$, Ω
Z_f	Impedancia serie del inductor del filtro, Ω
Z_l	Impedancia de la línea entre el filtro y el PCC, Ω
Z_{load}	Impedancia de la carga, Ω
Control e identificación	
$\Delta \%$	Mejora relativa del error de seguimiento atribuida a la PINN, %
$\boldsymbol{\eta}$	Salida logarítmica de la PINN, $\boldsymbol{\eta} = \ln \boldsymbol{\rho}$
$g(\mathbf{u})$	Función de costo del control predictivo, error de seguimiento de corriente
g_{lim}	Término de penalización por exceso de corriente en la función de costo
γ_m	Cuota del maestro en el reparto de potencia, adimensional
i_{esc}, v_{esc}	Escalas de normalización de la pérdida física, A y V
K_I	Ganancia integral del seguimiento de corriente en marco sincrónico
$K_{I,v}$	Ganancia integral del lazo de tensión del maestro
$K_{p,PLL}, K_{i,PLL}$	Ganancias proporcional e integral del SRF-PLL
K_v	Ganancia del lazo de tensión del maestro, A/V
$k_{pq,s}$	Ganancia del integrador externo de potencia de los esclavos
$k_{p,droop}, k_{q,droop}$	Pendientes de tensión y de frecuencia del <i>droop</i>
k_{sogi}	Ganancia del integrador generalizado de segundo orden
λ_v, λ_i	Pesos de seguimiento de tensión y corriente del FCS-MPC
$\lambda_d, \lambda_p, \lambda_r$	Pesos de los términos de datos, física y regularización de la pérdida de la PINN

Símbolo	Significado y unidad
$\text{sat}_{[a,b]}(\cdot)$	Recorte de una variable escalar al intervalo $[a, b]$
$\text{proj}_{\mathcal{C}}(\cdot)$	Proyección euclidiana sobre el conjunto convexo $\mathcal{C}$, que lleva el vector de tensión al punto admisible más próximo
$\rho_{Lf}, \rho_{Cf}, \rho_{Rfc}$	Factores de reescalado paramétrico, $\boldsymbol{\rho} = \exp(\boldsymbol{\eta})$, adimensionales.
G	Bandera binaria de modo de operación, 1 conectado a red y 0 isla. No es una magnitud física, se fija en la configuración del ensayo
τ_{ad}	Constante de tiempo del filtro <i>washout</i> , s
τ_{pq}	Constante de tiempo del filtro de potencias instantáneas, s
$\theta_{pll}, \omega_{pll}$	Ángulo y frecuencia estimados por el SRF-PLL, rad y rad/s
$\mathcal{U}$	Conjunto de control admisible, finito en el Escenario 1 y continuo en el Escenario 2
ξ_v	Estado del integrador del lazo de tensión, V
ζ	Coefficiente de amortiguamiento del par resonante del filtro
ω	Frecuencia angular, rad/s
ω_{nom}	Frecuencia angular nominal de la red, rad/s
Siglas	
ARX–RLS	Modelo autorregresivo con entrada exógena e identificación por mínimos cuadrados recursivos
CCS-MPC	<i>Continuous Control Set Model Predictive Control</i> , control predictivo de conjunto de control continuo. Requiere modulador por construcción
ESR	Resistencia serie equivalente del condensador (<i>Equivalent Series Resistance</i>)
FCS-MPC	<i>Finite Control Set Model Predictive Control</i>
LCL	Filtro inductor–condensador–inductor
LHS	Muestreo por hipercubo latino (<i>Latin Hypercube Sampling</i>)
LPF	Filtro pasa-bajos (<i>Low-Pass Filter</i>)
MLP	Perceptrón multicapa (<i>Multilayer Perceptron</i>)
MMPC	Control predictivo modulado
MPC	Control predictivo basado en modelo
PCC	Punto de acoplamiento común
PINN	Red neuronal informada por física
PLL	Lazo de seguimiento de fase
PSD	Detector de secuencia positiva (<i>Positive Sequence Detector</i>)
PWM	Modulación por ancho de pulso
RMSE	Raíz del error cuadrático medio
RPC	Llamada a procedimiento remoto (<i>Remote Procedure Call</i>)
SOGI-PSD	Integrador generalizado de segundo orden con detección de secuencia positiva (<i>Second-Order Generalized Integrator with Positive-Sequence Detection</i>)
SRF-PLL	Lazo de seguimiento de fase en marco de referencia sincrónico (<i>Synchronous Reference Frame Phase-Locked Loop</i>)
THD	Distorsión armónica total (<i>Total Harmonic Distortion</i>)
VSI	Inversor fuente de tensión (<i>Voltage Source Inverter</i>)

Resumen

El control predictivo basado en modelo con conjunto finito de estados de conmutación (FCS-MPC, *Finite Control Set Model Predictive Control*) gobierna convertidores de potencia evaluando directamente sus estados de conmutación, y su desempeño depende de la fidelidad del modelo discreto que emplea para predecir. Ahí nace el problema que esta memoria aborda. Los componentes reactivos de un filtro no conservan su valor nominal en servicio, por tolerancia de fabricación, temperatura y saturación magnética, de modo que el predictor trabaja con parámetros que ya no describen la planta. En una microrred maestro–esclavo las desviaciones de la inductancia L_f y la capacitancia C_f degradan el seguimiento del convertidor maestro, con especial sensibilidad cuando este forma la tensión en modo isla.

La propuesta es una red neuronal informada por física (PINN, *Physics-Informed Neural Network*) que actúa como módulo de corrección paramétrica del filtro inductor–condensador (LC) del maestro. La PINN infiere en línea los factores de escala ρ_{L_f} y ρ_{C_f} a partir de mediciones y de la memoria del controlador, y con ellos reescala los parámetros efectivos del predictor sin alterar las referencias, los pesos de la función de costo ni la decisión del MPC. El entrenamiento es íntegramente fuera de línea, con una pérdida que combina supervisión paramétrica, coherencia con el modelo discreto y regularización, y la inferencia se exporta como operaciones matriz–vector embebidas en el C-Script de PLECS. La arquitectura conserva una tercera salida asociada a la resistencia de la rama capacitiva, pero su etiqueta de entrenamiento es constante y el factor exportado vale idénticamente uno, de modo que solo los dos parámetros reactivos reescalan el predictor desplegado. Las dos resistencias del filtro, la de la rama capacitiva R_{fc} y la serie del inductor R_f , quedan fuera del espacio sobre el que se concluye por su escasa observabilidad a la frecuencia fundamental, decisión respaldada con evidencia medida.

La validación recorre dos esquemas de control sobre la misma planta, un maestro con filtro LC y dos esclavos con filtro inductor–condensador–inductor (LCL), en modo conectado a la red y en isla. El Escenario 1 emplea actuación directa por conjunto finito. El Escenario 2 relaja el conjunto admisible a uno continuo y delega la síntesis de la tensión en un modulador por ancho de pulso (PWM, *Pulse-Width Modulation*) simétrico de portadora fija, con amortiguamiento activo, filtro *washout*, lazo de tensión del maestro e integradores de seguimiento. Se demuestra que la ley *deadbeat* resultante resuelve en forma analítica el subproblema predictivo de corriente sobre ese conjunto continuo. Ambos esquemas se comparan a igual frecuencia efectiva de conmutación, 2.33 kHz, lo que obliga al modulado a operar con un periodo de muestreo 2.15 veces mayor. La comparación revela además una asimetría que no es intrínseca a la modulación. El conjunto finito dispone del hexágono completo y alcanza una tensión de fase de $V_{dc}/\sqrt{3}$, mientras el modulado, con modulación senoidal sin inyección de secuencia cero, queda limitado a $V_{dc}/2$, un 13.4% menor. Parte

de la desventaja que se observa en los niveles altos de perturbación procede de esa decisión de implementación.

Los resultados se ordenan con un criterio común a las dos campañas. Cada corrida se evalúa sobre una ventana de régimen permanente mediante la raíz del error cuadrático medio de la señal relevante al modo, y cada nivel de perturbación se clasifica como rescate, neutralidad o daño según un umbral del $\pm 5\%$ sobre la mejora porcentual junto a un piso de sensibilidad de 0.5 A o 0.5 V que evita clasificar diferencias indistinguibles del *ripple*. Las perturbaciones se organizan en direcciones del plano logarítmico de los dos factores, lo que separa los efectos de resonancia y de impedancia característica. Con ese criterio, la corrección aporta de forma robusta donde el error dominante es paramétrico, queda próxima a la neutralidad cuando el modelo nominal ya es competente y encuentra su límite donde el convertidor agota el margen de tensión disponible, restricción física que ningún estimador puede superar. La comparación entre esquemas arroja además el resultado central, porque el modulado entrega mejor calidad de forma de onda y frecuencia fija, ventajas ya reportadas, pero en la configuración ensayada el error mediano de identificación de la inductancia aumenta del 3.5 al 6.9 %, cifra próxima a la razón entre los periodos de muestreo, concordancia numérica que se reporta como tal y no como atribución causal demostrada.

Una campaña adicional, formada por 56 ensayos principales y 50 complementarios, recorre consignas activas y reactivas entre 0.25 y 2 pu de la carga. El sistema reproduce los regímenes de aporte, flujo activo residual y absorción en conexión a la red, además del reparto interno en isla. Frente al despacho, el recorrido mediano de ρ_{Lf} es del 3.01 % en el Escenario 1 y del 21.67 % en el Escenario 2, lo que deja la sensibilidad del identificador inductivo del esquema modulado como una limitación abierta. Por último, un ensayo factorial de 20 simulaciones extiende la corrección a los tres convertidores. Los identificadores de los esclavos estiman su propia perturbación con errores inferiores al 0.65 % y la sensibilidad cruzada máxima es del 0.025 % en red y del 2.53 % en isla. Esta evidencia respalda una separación alta, aunque no una independencia exacta. La memoria es de carácter integrador, combina herramientas establecidas y cuantifica tanto el cambio de precisión que acompaña el despliegue del identificador como los límites dentro de los cuales la corrección resulta útil.

El documento se organiza como sigue. El Capítulo 1 plantea el problema y la motivación. El Capítulo 2 fija el objetivo general, los específicos y los alcances. El Capítulo 3 reúne el marco teórico, microrredes y coordinación maestro-esclavo, convertidores y filtros de salida, FCS-MPC frente a MPC modulado, incertidumbre paramétrica e identificación, y redes neuronales informadas por física. El Capítulo 4 desarrolla la plataforma de simulación y la topología, la representación matemática, la construcción progresiva del Escenario 1 y del Escenario 2, la formulación de la PINN y su integración en el C-Script del maestro, y los criterios de validación. El Capítulo 5 presenta las referencias analíticas de estabilidad y de tensión disponible, la calidad de la identificación en línea, las campañas por grupos de perturbación de ambos escenarios, el balance energético del enlace de continua, el ensayo de consignas de potencia, el ensayo de retirada del término físico de la pérdida y la extensión de la corrección a los tres convertidores. El Capítulo 6 responde la pregunta que guía el trabajo, revisa los objetivos uno a uno y enuncia el trabajo futuro. El Apéndice A reúne la configuración reproducible, las deducciones auxiliares y la trazabilidad de las campañas, y el Apéndice B agrupa las figuras complementarias de resultados.

Abstract

Finite Control Set Model Predictive Control (FCS-MPC) governs power converters by directly evaluating their switching states. Its performance nevertheless depends on the fidelity of the discrete model. In a master–slave microgrid, deviations in the inductance L_f and capacitance C_f alter the master–converter predictor and degrade tracking, particularly when the master must form the islanded voltage. Both filter resistances, the capacitor-branch resistance R_{fc} and the inductor series resistance R_f , are left unperturbed in the plant and fall outside the space on which conclusions are drawn, a decision justified by their poor observability at the fundamental frequency and supported by measured evidence.

This thesis develops a Physics-Informed Neural Network (PINN) as a parameter-identification module for the master’s inductor–capacitor (LC) filter. From measurements and controller memory, the network estimates online the factors ρ_{Lf} and ρ_{Cf} . The architecture retains a third output associated with R_{fc} , but its constant training label makes the exported factor identically equal to one. Only the two reactive parameters therefore rescale the deployed predictor. Training is performed offline in MATLAB with a loss that combines parameter supervision, consistency with the discrete model, and regularization. The resulting inference is exported as matrix–vector operations and embedded in the PLECS C-Script, running at the controller update rate of each scenario without changing references, cost-function weights, or the MPC decision.

The method is first validated in Scenario 1, a microgrid comprising one LC-filtered master, two inductor–capacitor–inductor (LCL)-filtered slaves, and FCS-MPC actuation in grid-connected and islanded operation. Both campaigns share a single evaluation criterion. Each run is assessed over a steady-state window through the root mean square error of the signal relevant to the mode, and each perturbation level is classified as rescue, neutrality, or damage using a $\pm 5\%$ threshold on the percentage improvement together with a 0.5 A or 0.5 V sensitivity floor that prevents classifying differences indistinguishable from ripple. Perturbations are organized as directions of the logarithmic plane of the two factors, which separates resonance effects from characteristic-impedance effects. Simulation sets with axial and coupled perturbations show that the value of the correction depends on the physical objective of each mode. In grid-connected operation, where the master tracks current, parameter rescaling robustly reduces model-mismatch error. In islanded operation, where the master forms voltage, identification restores tracking while control authority remains available. The analysis separates this correctable error from the voltage ceiling imposed by the DC bus, load, and filter characteristic impedance, a limit that no estimator can overcome.

Scenario 2 relaxes the finite control set to a continuous one and delegates voltage synthesis to a fixed-carrier symmetrical Pulse-Width Modulation (PWM) stage. The re-

sulting deadbeat law is shown to solve the predictive current-control subproblem in closed form over that continuous set, so the scheme belongs to the Continuous Control Set MPC (CCS-MPC) family. The external loops are not part of this equivalence. On that basis it adds washout-filtered active damping, a master voltage loop, and output-current tracking integrators. Both strategies are compared at equal effective switching frequency, 2.33 kHz, which forces the modulated scheme to operate with a sampling period 2.15 times longer than that of the finite control set. The comparison further reveals an asymmetry that is not intrinsic to modulation. The finite control set has the full voltage hexagon available and reaches a phase voltage of $V_{dc}/\sqrt{3}$, whereas the modulated scheme, using sinusoidal modulation without zero-sequence injection, is limited to $V_{dc}/2$, some 13.4 % lower. Part of the disadvantage observed at high perturbation levels stems from that implementation choice.

This comparison yields the central result of the thesis. The modulated scheme delivers higher-quality waveforms and a fixed switching frequency, advantages already reported in the literature, while the tested configuration increases the median inductance-identification error from 3.5 to 6.9 %. The ratio between both errors is close to the ratio between the sampling periods. This is, however, a numerical agreement across two architectures rather than a demonstrated causal attribution, which would require a dedicated ablation. An additional campaign comprising 56 main and 50 complementary tests sweeps active- and reactive-power setpoints from 0.25 to 2 pu of the load. It verifies import, near-zero active exchange, and export in grid-connected operation, as well as internal sharing in islanded operation. Across dispatch points, the median range of ρ_{Lf} is 3.01 % in Scenario 1 and 21.67 % in Scenario 2, leaving the operating-point sensitivity of the modulated identifier as an open limitation. A final 20-simulation factorial study deploys one identifier in each converter. The slave identifiers estimate their own perturbations with errors below 0.65 %. Maximum cross-sensitivity is 0.025 % in grid-connected operation and 2.53 % in islanded operation, which supports strong separation but not exact independence. The thesis is integrative in nature. It combines established tools and quantifies both the change in identification accuracy that accompanies deployment and the limits within which the correction remains useful.

Capítulo 1

Introducción

1.1. Contexto y motivación

La integración de generación renovable y almacenamiento mediante electrónica de potencia ha convertido a los convertidores en elementos activos de la estabilidad y la coordinación de las microrredes. Estos sistemas deben conservar calidad de tensión, frecuencia y reparto de potencia tanto conectados a una red externa como durante la operación aislada [1, 2]. El problema no se limita al control de una unidad, porque las decisiones locales de cada convertidor modifican el punto de acoplamiento común (PCC) y condicionan la respuesta del resto de la microrred.

La arquitectura maestro-esclavo entrega una separación funcional útil para estudiar esa interacción, y el Capítulo 3 la desarrolla. En [3] se propone una coordinación basada en control predictivo de conjunto finito (FCS-MPC, *Finite Control Set Model Predictive Control*), validada sobre convertidores de punto neutro enclavado (NPC, *Neutral-Point-Clamped*) de tres niveles. La presente memoria toma esa organización como referencia, la adapta a inversores fuente de tensión (VSI, *Voltage Source Inverter*) de dos niveles y construye una plataforma propia en PLECS para estudiar incertidumbre paramétrica e identificación informada por física.

Lo particular del FCS-MPC no es usar un modelo de la planta, cosa que hace cualquier estrategia de control, sino resolver en cada periodo de muestreo una decisión discreta evaluando el conjunto finito de estados de conmutación sobre un modelo explícito, sin modulador intermedio [4, 5]. De ahí se sigue su vulnerabilidad. Un controlador clásico realimentado absorbe parte del desajuste en el propio lazo, mientras que aquí el modelo discreto es el único juez de la decisión. Si sus parámetros no representan al filtro real, el controlador resuelve correctamente el problema de una planta equivocada, y el error no procede de la optimización sino de la predicción sobre la que esta decide.

1.2. Desajuste del modelo, límites físicos y propuesta

El convertidor maestro utiliza un filtro LC cuyos parámetros se apartan de sus valores nominales por tolerancias, temperatura, envejecimiento y saturación magnética. Las desviaciones de L_f y C_f modifican los coeficientes discretos del predictor y se propagan a los horizontes de corriente y tensión, lo que en modo conectado a la red aparece como

error en la corriente de salida y en isla afecta a la tensión que sostiene toda la microrred. Corregir esos parámetros no elimina los límites del convertidor, porque aun conociéndolos con exactitud el bus de continua y la región lineal del modulador acotan la tensión sintetizable. Conviene por tanto separar desde el principio dos fenómenos que una comparación puramente numérica confunde, el error de modelo que un identificador reduce y el límite de tensión que pertenece al dimensionamiento de la planta.

Una segunda dificultad procede de la actuación del conjunto finito, cuya selección directa de estados produce frecuencia de conmutación variable y un espectro más disperso que el de una estrategia modulada [6]. Para acercar la plataforma a una implementación convencional se estudia si la identificación conserva utilidad al sustituir el FCS-MPC por un MPC modulado con modulación por ancho de pulso (PWM), comparando a igual esfuerzo de conmutación de los semiconductores y no a igual frecuencia de cálculo.

La pregunta que guía el trabajo es la siguiente, ¿en qué niveles de desviación paramétrica del filtro una identificación informada por física mejora el predictor y el desempeño eléctrico de una microrred maestro-esclavo, y dónde la respuesta queda dominada por el margen de tensión del convertidor o por un lazo de control que ya anula el error por sí mismo?

La propuesta que la responde es una red neuronal informada por física (*Physics-Informed Neural Network*, PINN) que corrige los parámetros del predictor del maestro. Recibe mediciones, diferencias temporales, referencias y memoria de la tensión aplicada, y entrega una salida logarítmica que se transforma en los factores positivos ρ_{Lf} y ρ_{Cf} . No genera pulsos, no modifica consignas y no sustituye al MPC, su función es informar el modelo con el que el controlador predice. El entrenamiento se ejecuta fuera de línea con datos de PLECS, con una pérdida que combina el factor de perturbación realmente aplicado, la coherencia de las transiciones medidas con el modelo discreto y una regularización, y la inferencia se exporta a C. Esa separación entre aprendizaje, estimación y acción permite comparar corridas sin y con identificación sobre exactamente la misma planta y las mismas referencias.

Conviene situar esa elección frente a lo que la literatura ya resuelve, antes de enunciar las contribuciones. El desajuste paramétrico del control predictivo admite un primer camino que renuncia al parámetro y lo absorbe como una perturbación agregada, con observadores de estado extendido [7], con un filtro de Kalman sobre un inversor con filtro LCL [8] o eliminando la dependencia paramétrica de la predicción y del cálculo de la referencia [9–12]. Esos esquemas cancelan el efecto del desajuste sin devolver el valor del parámetro ni su interpretación física. El segundo camino sí lo recupera, y se ha consolidado como problema inverso en electrónica de potencia. La formulación informada por física para convertidores conmutados se establece en [13, 14], la identificación en línea de la impedancia de un convertidor fuente de tensión con conocimiento físico embebido sostiene la viabilidad de ejecutar la inferencia dentro del periodo de muestreo [15], y en [16] se estiman la inductancia y la capacitancia de un filtro LC en un inversor conectado a la red, que es el caso del maestro. Las revisiones disponibles separan el empleo de una red neuronal informada por física como simulador de la dinámica del empleo como estimador inverso, que es la categoría de este trabajo [17, 18]. El primer uso lo ilustra [19] y el segundo, sobre dinámica de sistemas eléctricos, [20]. El contacto entre ambas líneas es todavía escaso. El acoplamiento con un control predictivo se ha demostrado sobre un convertidor reductor de continua [21], y la extracción de parámetros con física embebida ha llegado a los equipos

de una microrred con el análisis de estabilidad de tensión como objetivo [22]. Lo que aquí se aporta no es la estimación en sí, sino su integración dentro del predictor del maestro que coordina la microrred, evaluada en los dos modos de operación y sostenida, con un ajuste propio para cada escenario, al pasar del conjunto finito al esquema modulado a igual esfuerzo de conmutación.

1.3. Contribuciones y delimitación

Las contribuciones son cinco. Una plataforma reproducible de microrred maestro–esclavo con operación dual, reparto saturado de consignas y modelos de conmutación en PLECS. La formulación e integración de un reescalado paramétrico informado por física dentro del predictor del maestro. Una caracterización sistemática que distingue mejora, neutralidad y daño a lo largo de perturbaciones axiales y acopladas del filtro. La transferencia de la arquitectura y del método de integración desde el conjunto finito hacia el MPC modulado con portadora fija, con una red neuronal ajustada para cada escenario. Y, como extensión, la identificación distribuida en los tres convertidores a la vez, con una red propia en cada esclavo.

La comparación entre esquemas se hace a igual frecuencia efectiva de conmutación, lo que evita comparar calidad de forma de onda entre frecuencias distintas, pero no equipara las pérdidas ni el esfuerzo computacional. Persisten diferencias en el periodo de muestreo, la síntesis de la acción y los lazos complementarios del modulado, de modo que los resultados se interpretan frente a ese conjunto y no se atribuyen a una sola causa ni a una sola diferencia estructural. El Capítulo 2 fija los objetivos y el alcance.

Capítulo 2

Objetivos y Alcances

2.1. Objetivo general

Evaluar la incorporación de una red neuronal al control predictivo del convertidor maestro de una microrred maestro-esclavo, concretada como una identificación paramétrica informada por física integrada a su predictor, y cuantificar su efecto sobre el seguimiento y la robustez ante desviaciones del filtro en los modos isla y conectado a red.

2.2. Objetivos específicos

1. Implementar en PLECS una microrred con un convertidor maestro de filtro LC, dos convertidores esclavos de filtro LCL, operación dual y reparto saturado de potencia.
2. Formular los predictores discretos y las referencias de los convertidores, verificando su concordancia con las mediciones, los horizontes temporales y las restricciones implementadas en los C-Scripts.
3. Seleccionar la arquitectura de red neuronal adecuada al problema inverso de identificación paramétrica y entrenarla como red informada por física, para estimar los factores de reescalado de L_f y C_f del maestro, conservando una tercera salida estructural asociada a R_{fc} y fijada en la unidad por el conjunto de ajuste.
4. Integrar la inferencia en el C-Script del maestro y ejecutar comparaciones sin y con PINN con parámetros nominales y perturbados, manteniendo idénticas condiciones eléctricas y de control.
5. Caracterizar el aporte de la identificación en términos de error de seguimiento, observabilidad paramétrica, estabilidad, saturación y flujos de potencia.
6. Implementar el Escenario 2 con MPC modulado, PWM de frecuencia fija y lazos complementarios, y evaluar la transferencia de la arquitectura y de la metodología de identificación mediante un ajuste propio para ese escenario.
7. Caracterizar la respuesta ante consignas de potencia conjuntas, desacopladas, ascendentes y descendentes, distinguiendo la orden solicitada de la referencia efectiva limitada por la rutina de reparto.

8. Delimitar la envolvente de validez, diferenciando el desajuste de modelo corregible de las restricciones físicas asociadas al bus, la corriente y la modulación.
9. Extender la corrección a las tres unidades mediante un identificador propio en cada convertidor, y comprobar sobre un ensayo factorial acotado si cada red responde principalmente al desajuste de su propio filtro.

La Sección 6.2 del capítulo de conclusiones recorre estos nueve objetivos uno a uno, con la evidencia que cierra cada uno y su veredicto explícito, y la Tabla 6.1 resume ese recorrido en una sola vista. Así, el cierre del trabajo puede verificarse sin inferir correspondencias entre capítulos.

Los objetivos no se abordan en el orden en que se enuncian, y anticipar dónde se trabaja cada uno ahorra reconstruirlo durante la lectura. Los objetivos 1 y 2 se desarrollan en las Secciones 4.2 y 4.3, y se completan con la construcción del Escenario 1 en la Sección 4.4. El objetivo 3 corresponde a la Sección 4.6 y el objetivo 4 a la Sección 4.7. El objetivo 5 se resuelve con la evidencia de las Secciones 5.2, 5.3, 5.4 y 5.5, y el objetivo 7 con la Sección 5.8. El objetivo 6 se reparte entre la formulación de la Sección 4.5 y los resultados de la Sección 5.6. El objetivo 8 se apoya en las Secciones 5.1 y 5.7, y el objetivo 9 se cierra en la Sección 5.10. La Sección 6.2 recorre después esa misma correspondencia en sentido inverso, desde cada objetivo hacia su veredicto.

2.3. Alcances

La validación es de simulación. Las campañas se ejecutan en PLECS con modelos de conmutación, coordinadas desde MATLAB, sobre la topología descrita en la Sección 4.2.1 con carga trifásica RL y en los dos modos de operación.

Conviene separar desde aquí el núcleo del trabajo de su extensión, porque el alcance no es el mismo. **El núcleo son los Escenarios 1 y 2**, donde la red neuronal actúa únicamente sobre el modelo interno del maestro, nunca sobre la ley de actuación, y los esclavos conservan parámetros nominales aunque su estrategia de control puede seleccionar entre conjunto finito y modulado. La arquitectura entrega tres componentes, pero la normalización fija $\rho_{Rfc} = 1$. El análisis y las conclusiones se restringen a L_f y C_f , que son los dos únicos que la campaña perturba y los dos únicos observables con la relación señal a ruido disponible. Las referencias, el reparto de potencia y la decisión final permanecen a cargo de los controladores predictivos.

La extensión es el Escenario 3, donde se despliega un identificador propio en cada una de las tres unidades y se perturban también los filtros LCL de los esclavos. Se aborda con un ensayo factorial acotado, cuyo propósito es comprobar si cada corrección responde a su propio filtro, y no con el barrido continuo de las dos campañas principales. Sus conclusiones se declaran con ese alcance en la Sección 5.10.

El alcance delimita también qué se compara y qué no. El contraste es interno, entre corridas sin y con identificación sobre la misma planta, las mismas referencias y la misma perturbación aplicada. No se implementan las alternativas libres de modelo que la literatura propone para el mismo problema, como los observadores de estado extendido [7], los estimadores basados en filtro de Kalman [8] o los predictores sin dependencia paramétrica [9, 11], de modo que ninguna afirmación de superioridad frente a ellas forma parte de

los resultados. Lo que sí se sostiene es una diferencia de naturaleza, un valor de parámetro interpretable frente a un término de perturbación agregado, con el reparto de costo que ordena la Tabla 3.2.

También se acota el estatus de la estimación misma. Los factores ρ_{Lf} y ρ_{Cf} se reportan como valores puntuales, sin intervalo de confianza asociado, porque la formulación adoptada es determinista. Las extensiones bayesianas de la identificación por PINN en sistemas dominados por convertidores permiten cuantificar esa incertidumbre [23] y quedan enunciadas como trabajo futuro, junto con la robustez ante ruido de medición. Del mismo modo, las garantías formales de estabilidad y seguridad exigibles cuando una red neuronal decide la actuación [24] no se invocan aquí, porque la PINN solo informa el modelo con el que el predictor evalúa las alternativas.

Quedan fuera del alcance la sintonización automática de los pesos del costo, la optimización del tiempo de cálculo, la regulación dinámica del bus de continua, la caracterización completa del filtro LCL de los esclavos mediante un barrido equivalente al del núcleo, la coordinación secundaria y la validación experimental, que se enuncia como trabajo futuro en el Capítulo 6 y no se aborda aquí.

Queda por último delimitar el estatus de las afirmaciones sobre estabilidad, porque conviven tres niveles distintos y no son intercambiables. Las cotas analíticas cerradas se derivan sobre modelos reducidos y son exactas únicamente para la reducción con que se obtienen. El sistema completo no se demuestra estable de forma analítica, sino que se evalúa numéricamente sobre la malla de escenarios. Y cuando se afirma que una condición no diverge debe entenderse ausencia de divergencia dentro de la ventana simulada, que es finita, y no estabilidad asintótica. Esta distinción se mantiene explícita en los Capítulos 5 y 6.

Capítulo 3

Marco Teórico

3.1. Microrredes y coordinación maestro–esclavo

Una microrred agrupa fuentes distribuidas, almacenamiento, cargas y convertidores dentro de una frontera eléctrica capaz de operar conectada a la red principal o de forma aislada [1]. Su control se organiza por escalas temporales, con una capa primaria que regula tensiones y corrientes en cada convertidor, una coordinación que asigna referencias de potencia, una capa secundaria que restaura desviaciones lentas de tensión y frecuencia, y una terciaria que resuelve el despacho económico [2]. Esta memoria se ocupa de la capa primaria y de la coordinación de referencias, que es donde actúa el predictor y donde el reescalado paramétrico tiene efecto. La secundaria no interviene porque la característica de caída está desactivada y el maestro impone directamente los valores nominales, y la terciaria opera tres órdenes de magnitud más lento.

En una coordinación maestro–esclavo el maestro define la referencia eléctrica cuando no existe una red externa rígida, y en isla actúa como unidad *grid-forming*. Los esclavos se sincronizan con el punto de acoplamiento común (PCC) y operan como unidades *grid-following*. Con la red conectada, su tensión fija la fase y la frecuencia comunes y los convertidores siguen sus referencias de corriente o potencia. La Figura 3.1 resume esa separación.

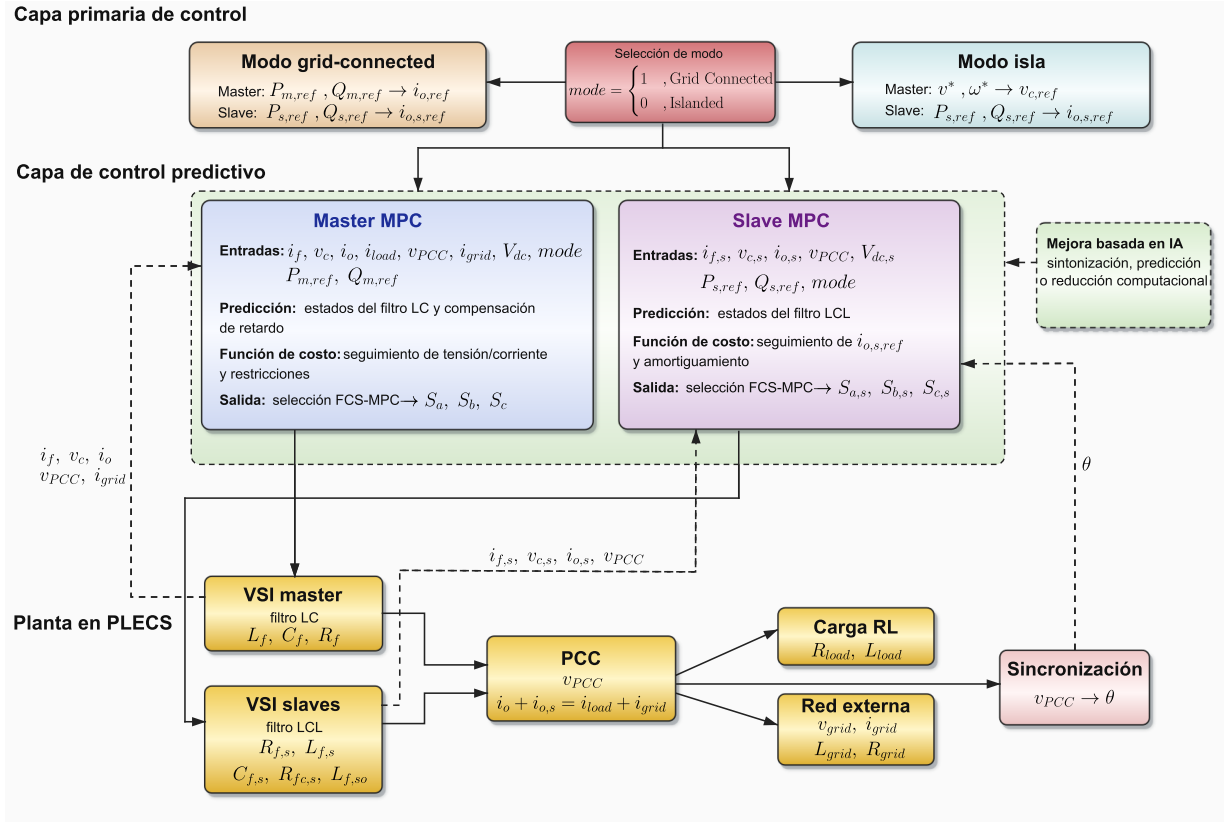


Figura 3.1. Jerarquía funcional de la microrred maestro-esclavo, capa primaria de selección de modo, capa de control predictivo del maestro y de los esclavos, y planta en PLECS.

3.2. Convertidores fuente de tensión y filtros de salida

Un inversor fuente de tensión trifásico de dos niveles (VSI) tiene ocho combinaciones de conmutación, dos estados por rama y tres ramas. Cada combinación define un vector en el plano $\alpha\beta$, con seis estados activos a una distancia $2V_{dc}/3$ del origen y separados 60° , más dos estados nulos en el origen. Los seis activos delimitan un hexágono regular, y toda tensión que el puente pueda sintetizar como promedio de un periodo queda dentro de él. La restricción es geométrica y ningún ajuste del algoritmo la modifica.

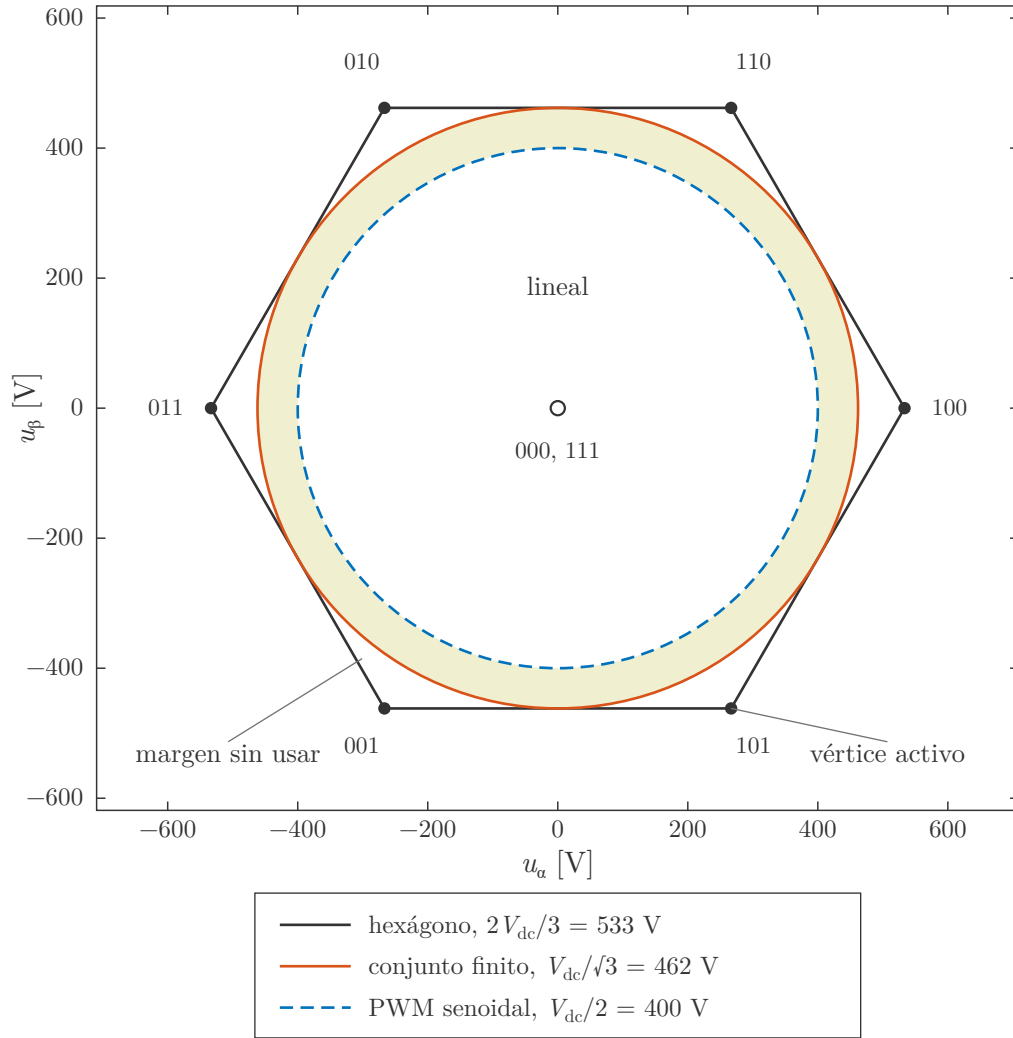


Figura 3.2. Conjunto de tensión alcanzable del VSI de dos niveles con $V_{dc} = 800 \text{ V}$.

La Figura 3.2 distingue tres regiones dentro del hexágono. La circunferencia inscrita, de radio

$$V_{lin} = \frac{2V_{dc}}{3} \cos 30^\circ = \frac{V_{dc}}{\sqrt{3}}, \quad (3.1)$$

es el radio de la mayor trayectoria circular que el puente sintetiza en todos los ángulos. Conviene precisar dos términos. La región comprendida entre esa circunferencia y el hexágono sigue siendo alcanzable, de modo que un vector aislado situado en ella se sintetiza sin saturar. La sobremodulación aparece cuando la trayectoria solicitada sale del hexágono, lo que ocurre con cualquier circunferencia de radio mayor que V_{lin} , cuyos arcos próximos a los flancos quedan fuera del conjunto mientras los tramos orientados hacia los vértices permanecen dentro. Solo esos arcos exteriores operan en sobremodulación, donde la fundamental obtenida crece menos que la solicitada y aparecen armónicos de orden bajo. Cada vértice es uno de los seis estados activos que el conjunto finito puede elegir en un periodo, y la operación en seis pasos es el caso particular en que cada vértice se sostiene un sexto del periodo de la fundamental. El hexágono lo fija el puente y es común a las

dos estrategias predictivas, mientras que la porción de su interior que cada una aprovecha depende de la síntesis empleada, y la banda sombreada de la figura es el margen que la modulación senoidal sin inyección de secuencia cero deja sin usar. La Tabla 3.1 recoge esa diferencia y el Capítulo 5 cuantifica sus consecuencias.

El filtro LC del maestro desacopla la tensión conmutada de la tensión formada. Su inductor limita el *ripple* de corriente y su condensador sostiene la tensión de salida. La dinámica continua ideal es

$$L_f \frac{d\mathbf{i}_f}{dt} = \mathbf{u} - R_f \mathbf{i}_f - \mathbf{v}_C - R_{fc}(\mathbf{i}_f - \mathbf{i}_o), \quad C_f \frac{d\mathbf{v}_C}{dt} = \mathbf{i}_f - \mathbf{i}_o. \quad (3.2)$$

El parámetro R_f representa las pérdidas serie del inductor y R_{fc} la resistencia serie de la rama capacitiva, dominada en este diseño por el amortiguamiento pasivo especificado y no por la resistencia parásita del condensador, que aporta a lo sumo una décima parte del total. Esa resistencia queda fuera de los parámetros perturbados de la campaña, decisión que una exploración específica respalda y que el Apéndice A.6 documenta.

Los esclavos emplean filtros LCL, donde la corriente del lado del PCC pasa a ser un estado dinámico adicional. El LCL atenúa más alrededor de la frecuencia de conmutación pero incorpora una resonancia que exige amortiguamiento pasivo, activo o ambos [25]. Esa diferencia topológica justifica que maestro y esclavos no compartan predictor ni variable primaria de costo.

3.3. Control predictivo de conjunto finito y MPC modulado

Un modelo discreto linealizado alrededor del periodo de muestreo adopta la forma general

$$\mathbf{x}[k+1] = \mathbf{A}(\mathbf{p})\mathbf{x}[k] + \mathbf{B}(\mathbf{p})\mathbf{u}[k] + \mathbf{E}(\mathbf{p})\mathbf{d}[k], \quad (3.3)$$

donde $\mathbf{x}[k]$ reúne las magnitudes dinámicas del filtro, $\mathbf{u}[k]$ es la variable manipulada, es decir aquella sobre la que el controlador decide, $\mathbf{d}[k]$ agrupa las magnitudes medidas que entran en la predicción sin ser objeto de control, y $\mathbf{p}$ son los parámetros del filtro. En la planta de esta memoria el estado son la corriente del inductor y la tensión del condensador, la variable manipulada es la tensión que el convertidor aplica en sus bornes, y las medidas no controladas son la corriente de salida y la tensión del PCC. Conviene notar que el predictivo no rechaza esas magnitudes como perturbaciones a la manera de un lazo clásico, sino que las incorpora al modelo para construir la predicción.

La matriz $\mathbf{A}(\mathbf{p})$ describe cómo evoluciona el filtro por sí solo entre dos instantes de muestreo, $\mathbf{B}(\mathbf{p})$ traduce la tensión aplicada en variación de estado y $\mathbf{E}(\mathbf{p})$ cumple ese papel para las magnitudes medidas. Las tres dependen de $\mathbf{p}$, y esa dependencia es la que convierte un desajuste físico en error de predicción. Para el filtro LC del maestro sus entradas son los coeficientes discretos a_i , b_i y b_c que desarrolla el Capítulo 4.

En FCS-MPC se propaga el modelo para cada vector admisible y se evalúa una función de costo,

$$g_r = \lambda_v \left\| \mathbf{v}^{ref} - \hat{\mathbf{v}}_r \right\|_2^2 + \lambda_i \left\| \mathbf{i}^{ref} - \hat{\mathbf{i}}_r \right\|_2^2 + g_{\lim,r}, \quad (3.4)$$

y se aplica el estado $r^{ref} = \arg \min_r g_r$. La decisión es discreta, solo cambia en los instantes de muestreo, y la frecuencia efectiva resulta variable porque el estado óptimo puede repetirse durante varios periodos [4, 5].

Existen varias formas de llevar el predictivo a frecuencia fija. La adoptada aquí calcula una tensión promedio continua invirtiendo la dinámica de corriente, lo que produce una referencia *deadbeat* que se transforma en índices de modulación y se sintetiza con PWM [26]. Ambas estrategias comparten la planta, las mediciones y el núcleo predictivo de corriente, lo que permite reutilizar el reescalado paramétrico. No difieren solo en la síntesis, también cambian el conjunto de acciones admisibles, el periodo de actualización empleado en esta implementación y los lazos complementarios que construyen la referencia. La Tabla 3.1 resume estas diferencias conceptuales. Los valores y sintonías específicos se reservan para el Capítulo 4.

Tabla 3.1
DIFERENCIAS CONCEPTUALES ENTRE LAS DOS ESTRATEGIAS PREDICTIVAS.

Aspecto	FCS-MPC	MPC modulado
Variable de decisión	Estado de conmutación	Tensión promedio o índice de modulación
Síntesis de pulsos	Actuación discreta del estado elegido	Comparación con portadora PWM
Frecuencia efectiva	Variable entre convertidores, dispositivos y puntos de operación	Determinada por la portadora salvo saturación o pulsos omitidos
Espectro	Disperso	Concentrado en la portadora y sus bandas laterales
Alcance de tensión	Circunferencia inscrita, $V_{dc}/\sqrt{3}$	$V_{dc}/2$ sin inyección de secuencia cero
Dependencia del modelo	Presente en la evaluación de candidatos	Presente en la inversión o formulación <i>deadbeat</i>

Comparar ambas exige medir la frecuencia sobre las compuertas finales y no sobre la de control, que no equivale a la efectiva de un dispositivo. El Capítulo 4 fija por eso un criterio de equiparación explícito y lo aplica a toda la campaña.

El amortiguamiento activo del Escenario 2 emplea un filtro *washout*, un pasa-altos de primer orden de función de transferencia

$$H_w(s) = \frac{\tau_{ad} s}{1 + \tau_{ad} s}, \quad (3.5)$$

con frecuencia de corte $\omega_c = 1/\tau_{ad}$. Su ganancia es nula en continua y tiende a la unidad muy por encima del corte, de modo que la salida es la parte rápida de la señal. La separación no es limpia, solo atenúa de manera creciente hacia abajo, y lo que el bloque consigue es favorecer el contenido resonante frente al fundamental, sesgo relativo que basta para amortiguar sin arrastrar un error de régimen. El Capítulo 4 desarrolla la implementación y cuantifica las dos ganancias con el valor adoptado.

3.4. Incertidumbre paramétrica e identificación

Un observador de estados estima variables dinámicas no medidas, mientras que un identificador paramétrico estima propiedades del modelo que se consideran constantes o lentamente variables. Esta memoria aborda el segundo problema, buscando factores que

relacionen los valores programados con los efectivos,

$$L_f^{eff} = \rho_{L_f} L_f, \quad C_f^{eff} = \rho_{C_f} C_f, \quad R_{fc}^{eff} = \rho_{R_{fc}} R_{fc} = R_{fc}. \quad (3.6)$$

La igualdad final corresponde a los modelos desplegados. La arquitectura conserva el canal $\rho_{R_{fc}}$, pero la etiqueta constante de la campaña hace que su desnormalización entregue exactamente la unidad. La corrección en línea recae por tanto sobre los dos parámetros reactivos.

La identificación es un problema inverso. Se conocen tensiones, corrientes, referencias y acciones pasadas, y se infieren los parámetros capaces de explicar esas transiciones. Su viabilidad depende de la excitación, porque un parámetro puede afectar poco a la variable medida en régimen y resultar difícil de separar de otros aunque la planta sea estable. De ahí que la exactitud del identificador y la mejora del control deban evaluarse como propiedades relacionadas pero distintas.

Entre los precursores están el filtro de Kalman [27] y los modelos autorregresivos con entrada exógena (ARX, *Auto-Regressive with eXogenous Input*) actualizados por mínimos cuadrados recursivos (RLS, *Recursive Least Squares*) [28]. El primero combina un modelo de estado con hipótesis de ruido y el segundo identifica una relación entrada-salida sin exigir el conocimiento explícito de todos los parámetros físicos. Ambos son referencias pertinentes, aunque su parametrización, actualización y costo en línea difieren de una inferencia neuronal de pesos fijos.

La elección entre ellos no se resuelve por exactitud sino por la estructura del problema, y conviene fijar el criterio antes de entrar en la implementación. Identificar de forma simultánea variaciones amplias de L_f y C_f , conservar una relación explícita con el predictor discreto y ejecutar la inferencia dentro del lazo de control son tres exigencias que pesan de distinta manera sobre cada enfoque. La Tabla 3.2 las contrasta.

Tabla 3.2
CRITERIO METODOLÓGICO PARA LA SELECCIÓN DEL ESTIMADOR PARAMÉTRICO

Enfoque	Fortaleza principal	Consideración para este problema
Kalman	Estimación recursiva de estados con tratamiento explícito del ruido	Requiere definir covarianzas y ampliar el estado para identificar varios parámetros
ARX-RLS	Adaptación en línea con formulación compacta	Identifica coeficientes entrada-salida que luego deben vincularse con los parámetros físicos
PINN paramétrica	Integra datos, restricciones físicas y salida directamente interpretable	Requiere una campaña fuera de línea representativa, la inferencia en línea queda reducida a operaciones matriciales

Ninguna de las tres filas descalifica a las otras dos, y lo que la tabla ordena es el reparto del costo. El filtro de Kalman y el estimador ARX-RLS trasladan el esfuerzo a la operación en línea, mientras una red informada por física lo concentra en una campaña previa y deja en operación una evaluación algebraica acotada, asimetría que decide cuando el identificador debe convivir con un control predictivo que ya resuelve una optimización

en cada periodo de muestreo. La exigencia de excitación, en cambio, no distingue entre enfoques, porque tanto un estimador recursivo como un observador de estado aumentado la heredan sobre los modos que pretenden identificar. La limitación que la Sección 5.8 cuantifica sobre el nivel de despacho es por tanto una propiedad del problema inverso y no del identificador elegido.

3.5. Redes neuronales informadas por física

Esta sección construye el componente aprendido de la plataforma en tres pasos, la unidad elemental de una red neuronal, la forma en que el residuo de un modelo físico entra en su función de pérdida, y el problema inverso de identificación paramétrica que esta memoria resuelve con esa herramienta.

3.5.1. La neurona artificial y la función de activación

Conviene fijar primero qué es una red neuronal, porque es el único componente aprendido de la plataforma que esta memoria construye y es lo que su título designa como inteligencia artificial. Su unidad elemental es la neurona artificial propuesta por McCulloch y Pitts, que la Figura 3.3 reproduce junto a la célula que la inspira. Cada entrada x_j llega afectada por un peso sináptico w_{ij} , la neurona suma esas contribuciones, resta un umbral θ_i y pasa el resultado por una función de activación,

$$y_i = f \left(\sum_j w_{ij} x_j - \theta_i \right). \quad (3.7)$$

La analogía con la biología explica la terminología, con las entradas en el papel de las dendritas, los pesos en el de cada sinapsis, la suma en el del potencial que integra el cuerpo celular y la salida en el del impulso que viaja por el axón. Lo que importa retener es dónde reside el conocimiento, y reside en los pesos y los umbrales, que son los números que el entrenamiento modifica. Una red se obtiene encadenando neuronas en capas, y con ello el conjunto deja de representar una combinación lineal y pasa a aproximar funciones no lineales [29].

Esa capacidad depende por completo de la función de activación, porque sin ella encadenar capas lineales produciría otra transformación lineal y la profundidad no aportaría nada. El panel (c) de la figura reúne las alternativas habituales. La tangente hiperbólica es la que esta memoria emplea en las capas ocultas, porque está acotada en $[-1, +1]$, es derivable en todo su dominio, lo que el ajuste por gradiente exige, y está centrada en cero, de modo que no introduce un sesgo sistemático en la propagación.

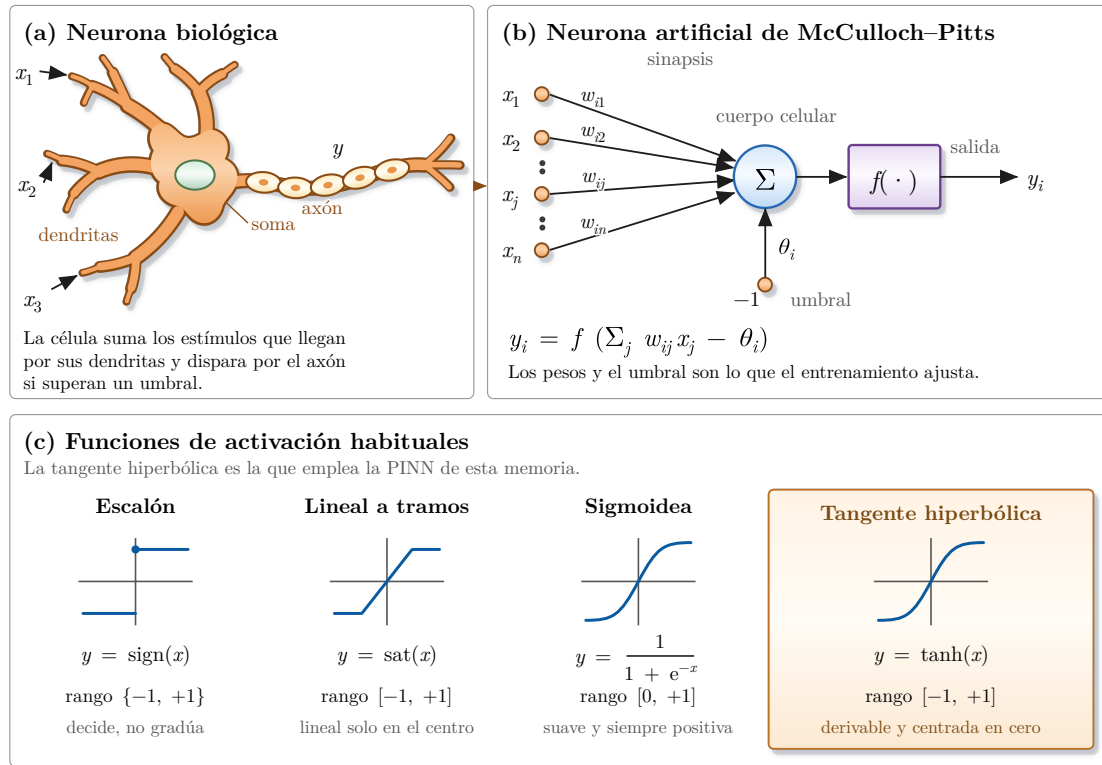


Figura 3.3. De la neurona biológica a la neurona artificial, y funciones de activación.

3.5.2. De la neurona a la red informada por física

Una red *feedforward* aproxima una función mediante composiciones afines y activaciones no lineales [30]. Para una entrada normalizada $\mathbf{z}_n$, una red de L capas se escribe como

$$\mathbf{h}^{(\ell+1)} = \sigma(\mathbf{W}^{(\ell)} \mathbf{h}^{(\ell)} + \mathbf{b}^{(\ell)}), \quad \mathbf{h}^{(0)} = \mathbf{z}_n, \quad \ell = 0, \dots, L-1, \quad (3.8)$$

donde $\mathbf{h}^{(\ell)}$ es el vector de salidas de la capa ℓ , llamadas activaciones, $\mathbf{W}^{(\ell)}$ y $\mathbf{b}^{(\ell)}$ son la matriz de pesos y el vector de sesgos que conectan la capa ℓ con la siguiente, y $\sigma(\cdot)$ es la función de activación, que se aplica componente a componente. El índice ℓ numera las capas, de modo que $\mathbf{h}^{(0)}$ es la entrada y $\mathbf{h}^{(L)}$ la salida.

Una red informada por física incorpora conocimiento del modelo dentro del aprendizaje, por ejemplo mediante residuos de ecuaciones diferenciales o discretas [31, 32]. Eso no la convierte en un simulador ni obliga a derivar en línea, porque la física puede participar solo durante el entrenamiento y la inferencia final conservar la forma de una red convencional.

En identificación paramétrica la pérdida que se minimiza reúne tres componentes,

$$\mathcal{L} = \lambda_d \mathcal{L}_{data} + \lambda_p \mathcal{L}_{phys} + \lambda_r \mathcal{L}_{reg}, \quad (3.9)$$

donde $\mathcal{L}$ es la pérdida total, $\mathcal{L}_{data}$ el término de datos, que mide la distancia entre la salida y el factor de perturbación realmente aplicado en cada escenario, $\mathcal{L}_{phys}$ el término físico, que penaliza transiciones incompatibles con el modelo discreto, y $\mathcal{L}_{reg}$ el término de regularización, que limita la magnitud de los pesos y no representa ninguna ley física

adicional. Los escalares λ_d , λ_p y λ_r son los pesos con que cada término entra en la suma, y el Capítulo 4 justifica sus valores. Esta separación es consistente con aplicaciones en sistemas de potencia, estimación de parámetros de convertidores y control predictivo [19, 33–35].

Para asegurar factores positivos la salida se interpreta en escala logarítmica,

$$\rho = \exp(\hat{\eta}), \quad (3.10)$$

con $\hat{\eta}$ la salida directa de la red neuronal, seguida de límites coherentes con la banda de entrenamiento. La normalización de entrada, los límites y los pesos deben exportarse juntos, porque cambiar la red neuronal sin sus estadísticos altera la función implementada.

Bajo el nombre de red informada por física conviven dos arquitecturas que resuelven el problema inverso de manera distinta, una que aproxima la solución de la ecuación y trata el parámetro como una incógnita del propio entrenamiento, y otra que aprende el mapa que va de una ventana de mediciones al parámetro. La diferencia condiciona la posibilidad de ejecutar el identificador dentro de un lazo de control, y por eso la elección entre ambas se trata como una decisión de método en la Sección 4.6.1 del Capítulo 4.

Capítulo 4

Métodos y Desarrollos

4.1. Enfoque metodológico y alcance de la implementación

Este capítulo documenta la plataforma construida en *PLECS* y las ecuaciones que la gobiernan, ordenadas desde la planta hacia la corrección por IA, de modo que el caso base quede separado de la propuesta y ningún error de formulación se le atribuya a la PINN. Se levanta sobre tres etapas. Una preliminar validó el convertidor maestro aislado y consolidó el selector de modo, el SRF-PLL, el detector opcional de secuencia positiva y la compensación del retardo digital. El *Escenario 1* añade dos esclavos con filtro LCL sincronizados al PCC y genera la campaña de datos. El *Escenario 2* conserva la misma planta y sustituye el conjunto finito por MPC modulado. Durante la generación de datos los parámetros reactivos del filtro del maestro se perturban en la planta mediante factores conocidos $\mathbf{K} = [K_{Lf}; K_{Cf}; 1]$, con el C-Script en valores nominales y la PINN desactivada, de modo que el desajuste entre planta y modelo queda conocido por construcción y define las etiquetas evaluadas $[\ln K_{Lf}; \ln K_{Cf}]$. La formulación de la corrección paramétrica se desarrolla en la Sección 4.6.

Por qué la variación paramétrica del filtro justifica una corrección en línea. Conviene establecer desde el principio que el problema que motiva este capítulo es físico y no una hipótesis de conveniencia. Los dos reactivos del filtro se apartan de su valor de catálogo por cuatro mecanismos de naturaleza distinta. La tolerancia de fabricación fija una dispersión inicial que ya está presente el primer día de servicio. La temperatura modifica la permeabilidad del núcleo y la resistividad del bobinado. La saturación magnética reduce la inductancia efectiva cuando la corriente instantánea crece, y lo hace dentro del propio ciclo de la fundamental. El envejecimiento del condensador de película retira área efectiva de sus placas de forma lenta y monótona. El Apéndice A.8 cuantifica la banda que resulta de componerlos, aproximadamente $K_{Lf} \in [0.5; 1.1]$ y $K_{Cf} \in [0.90; 1.10]$.

Por qué no basta con sustituir el componente. La respuesta de *hardware* ante un parámetro que se desvía es cambiar la pieza, y conviene explicar por qué aquí no cierra el problema. Dos de los cuatro mecanismos no son defectos que un recambio elimine. La saturación y la variación térmica son el comportamiento normal de un inductor sano, de modo que un componente nuevo reproduce la misma desviación desde el primer arranque. Los otros dos

sí admitirían una respuesta de mantenimiento, pero exigirían caracterizar cada unidad en la puesta en marcha y repetir la medida a lo largo de su vida, con parada de la instalación, y aun así no cubrirían la parte que depende del punto de operación. La distinción decisiva es otra. El predictor no necesita el valor de catálogo del componente sino su *valor efectivo en el punto de operación actual*, que ningún recambio entrega y que solo puede establecerse mientras el convertidor trabaja. De ahí que la corrección deba ser en línea y que su lugar sea el modelo interno del controlador y no la planta.

Alcance de la implementación

1. Estudio por simulación en *PLECS* con procesamiento en MATLAB.
2. Topología, maestro con filtro LC y dos esclavos con filtro LCL.
3. Control de bajo nivel mediante MPC predictivo en bloques **C-Script**.
4. El maestro regula $v_{C,m}$ y los esclavos regulan $i_{f,s}$.
5. La arquitectura conserva tres salidas. La campaña perturba y evalúa $L_{f,m}$ y $C_{f,m}$, mientras $K_{Rfc} = 1$ en todos los datos. Por ello la normalización exportada fija $\rho_{Rfc} = 1$ y solo ρ_{Lf} y ρ_{Cf} modifican el predictor desplegado.
6. El entrenamiento es íntegramente **fuera de línea** en MATLAB. En lazo cerrado la PINN solo ejecuta inferencia embebida en C, sin aprendizaje ni actualización de pesos durante la simulación.

4.2. Plataforma de simulación, topología eléctrica y parámetros

La plataforma corresponde a *PLECS Standalone*, con la planta eléctrica modelada en tiempo continuo y los controladores predictivos implementados de forma discreta en bloques **C-Script**. Los dispositivos de electrónica de potencia se modelan como elementos ideales, lo que concentra el análisis en la formulación del FCS-MPC, la coordinación maestro-esclavo y el ajuste paramétrico de la PINN.

El cómputo se reparte en dos entornos complementarios. PLECS contiene la planta, los convertidores, los filtros, el PCC, la carga, la red externa y los **C-Script** que ejecutan el control en lazo cerrado con la inferencia de la PINN embebida en C. MATLAB se usa solo fuera de línea, lee los registros exportados, construye las etiquetas de identificación $\eta^{tgt} = \ln \mathbf{K}$, entrena y valida la red neuronal y exporta los pesos a C. Esta separación impide mezclar la validación del controlador con el entrenamiento de la PINN.

La frecuencia de muestreo y actualización del controlador, y su periodo asociado son:

$$f_s = 10 \text{ kHz}, \quad T_s = \frac{1}{f_s} = 100 \text{ } \mu\text{s}. \quad (4.1)$$

Este mismo T_s se emplea en los C-Script del maestro y de los esclavos, en la exportación de datos y en la construcción de los conjuntos de entrenamiento. La consistencia temporal es necesaria porque la PINN identifica los factores de escala a partir de mediciones muestreadas a este mismo T_s , por lo que sus entradas deben alinearse con el horizonte discreto del FCS-MPC. La igualdad $f_s = 10 \text{ kHz}$ no implica que cada semiconductor conmute a esa frecuencia, porque la actividad efectiva se obtiene de las compuertas finales. El periodo

de muestreo del Escenario 2 es distinto y queda fijado por el criterio de equiparación de la Sección 4.5.1.

4.2.1. Topología eléctrica

La topología vigente corresponde al sistema maestro-esclavo del Escenario 1, que conserva la base validada durante la etapa preliminar desde el maestro hasta el PCC e incorpora dos esclavos sobre el mismo nodo común. La Figura 4.1 recoge todos sus elementos, un convertidor maestro alimentado por una fuente continua ideal y filtrado por una red LC, dos esclavos idénticos con bus propio y filtro LCL, la impedancia de línea de cada unidad hasta el PCC, la carga RL balanceada y la red equivalente externa. Los valores están en la Tabla 4.3.

El maestro regula $v_{c,m}$ según el modo, formando tensión y frecuencia en isla y operando sincronizado al sistema externo en modo conectado a la red. Los esclavos son unidades *grid-following* cuya variable de costo es $i_{f,s}$, mientras $v_{c,s}$ e $i_{o,s}$ son estados de su predictor y no objetivos de seguimiento. El PCC no es una variable de control sino un nodo de acople, y su tensión resulta de la interacción entre maestro, esclavos, carga y red, de modo que el problema se plantea como coordinación de convertidores y no como regulación directa de v_{PCC} .

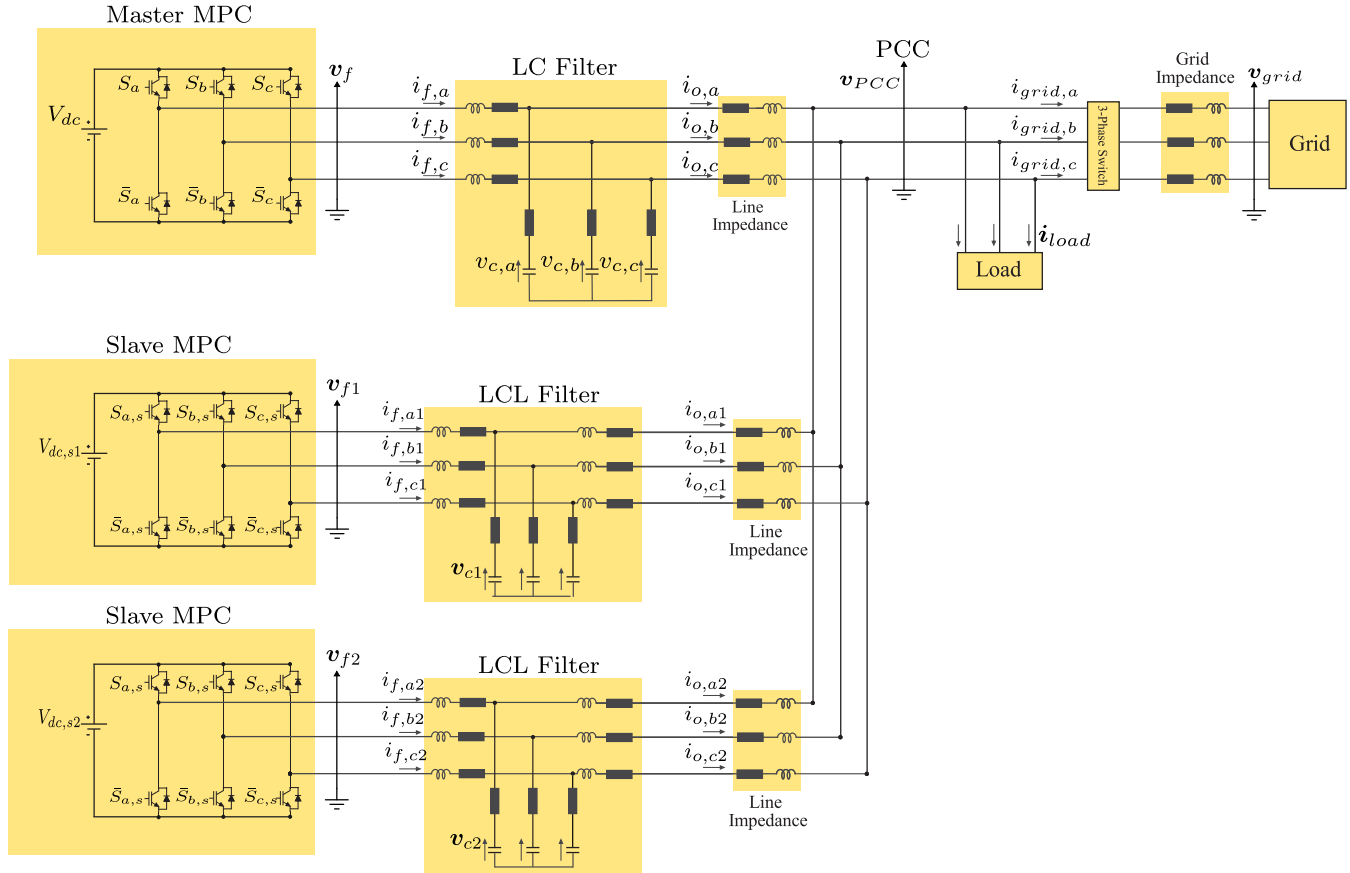


Figura 4.1. Topología general del sistema maestro-esclavo implementado en PLECS, convertidor maestro con filtro LC, dos convertidores esclavos idénticos con filtro LCL conectados en paralelo al mismo PCC, carga y red equivalente externa. Los fasores espaciales se escriben en *negrita* y las magnitudes por fase, en *cursiva*.

Por qué el maestro lleva filtro LC y los esclavos filtro LCL. La asimetría de filtros no es una particularidad heredada de la arquitectura de referencia [3] sino una consecuencia de qué variable regula cada convertidor. El maestro impone la tensión del condensador $v_{C,m}$ y necesita que ese condensador sea su nodo terminal, cosa que el filtro LC garantiza. Una segunda inductancia situaría una resonancia dentro del camino de la propia variable regulada, que es lo que una unidad *grid-forming* no puede permitirse. El esclavo regula la corriente del lado inversor e inyecta sobre una tensión que ya existe, de modo que su condensador puede quedar embebido en el filtro. La diferencia se lee en las funciones de costo, donde el maestro conserva término de tensión en los dos modos y el del esclavo carece de él por completo.

El criterio de atenuación apunta en el mismo sentido. En el modelo ideal sin resistencia de amortiguamiento, para una unidad que inyecta corriente la transferencia desde la tensión del inversor hasta la corriente entregada cae a -20 dB/dec con filtro inductivo y a -60 dB/dec con filtro LCL por encima de su resonancia, lo que alcanza el mismo contenido armónico con mucha menos inductancia total y preserva margen de tensión sobre el bus de continua [25, 36]. Con los valores de la Tabla 4.3 el filtro LC del maestro resuena en $f_{res,m} = 1/(2\pi\sqrt{L_f C_f}) \approx 130$ Hz. El filtro LCL del esclavo contiene $L_{f,s}$, $C_{f,s}$ y $L_{f,so}$. La

línea añade $L_{l,s}$ en serie con $L_{f,so}$. Para la transferencia hasta un PCC ideal de tensión, omitiendo resistencias, la frecuencia natural del conjunto es

$$f_{\text{res},LCL} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L_{f,s} + L_{f,so} + L_{l,s}}{L_{f,s}(L_{f,so} + L_{l,s})C_{f,s}}} \approx 640 \text{ Hz}, \quad (4.2)$$

Sin línea ($L_{l,s} = 0$) se obtienen 669 Hz, frente a 640 Hz con ella. Son frecuencias naturales no amortiguadas, pues la resistencia de rama, los retardos y la impedancia del PCC modifican la respuesta. En isla, esta última depende además del maestro y de los otros convertidores.

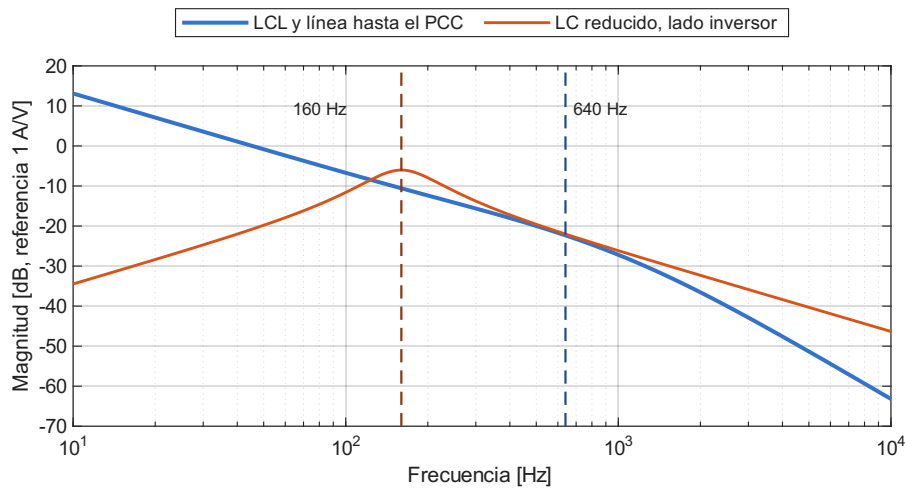


Figura 4.2. Modelos LCL con línea y LC reducido del esclavo.

El par reducido del predictor trata i_o como entrada exógena y tiene frecuencia natural $f_{\text{res},LC,s} = 1/(2\pi\sqrt{L_{f,s}C_{f,s}}) \approx 160 \text{ Hz}$. No elimina físicamente la rama de salida ni representa otro modo del LCL completo. La Figura 4.2 compara este subsistema local (naranja) con la transferencia de inyección al PCC rígido (azul, 640 Hz). Ambas conservan $R_{fc,s} = 2 \Omega$, frente a $R_{fc,m} = 0.5 \Omega$ del maestro. Esa resistencia introduce un cero y limita la atenuación asintótica del LCL a -40 dB/dec . El máximo amortiguado puede desplazarse o desaparecer, y la resonancia del conjunto conectado exige conservar la rama de salida y la impedancia externa.

El maestro respalda su bus con almacenamiento, por lo que su potencia no depende de un recurso externo, condición necesaria para actuar como nodo de balance en isla. Los esclavos respaldan el suyo con generación fotovoltaica, cuya potencia activa disponible la fija la irradiancia [3].

En modo conectado a la red el maestro opera también como unidad *grid-following* y conserva su filtro LC. No hay contradicción, porque el filtro es *hardware* y el modo es una decisión del control. El convertidor se dimensiona para su condición más exigente, que es formar tensión en isla, y el modo conectado a la red es un régimen del mismo equipo. Un

filtro LCL en el maestro obligaría a formar tensión a través de una inductancia de salida precisamente en el instante del paso a isla, que es el caso que la elección LC evita.

La plataforma cumple tres funciones, validar el caso base, generar los datos de entrenamiento mediante perturbaciones controladas sobre los filtros, y comparar el predictor nominal contra el corregido manteniendo idénticas planta, consignas y condiciones.

4.2.2. Parámetros de simulación

Tabla 4.1

PARÁMETROS DE LA ETAPA ACTUAL, MAESTRO, PLANTA Y CONFIGURACIÓN DEL C-SCRIPT.

Parámetro	Símbolo	Valor
<i>Magnitudes comunes y planta PLECS</i>		
Frecuencia nominal	f_{nom}	50 Hz
Frecuencia angular nominal	ω_{nom}	$2\pi \cdot 50$ rad/s
Frecuencia de muestreo y control	f_s	10 kHz
Periodo de muestreo	T_s	100 μ s
Tensión del bus DC	V_{dc}	800 V
Capacitancia del bus DC	C_{dc}	2200 μ F
Valor máximo instantáneo fase-neutro de referencia	v_{nom}	220 V
<i>Filtro LC del maestro</i>		
Inductancia del filtro	L_f	3 mH
Resistencia serie del filtro	R_f	0.012 Ω
Capacitancia del filtro	C_f	500 μ F
Resistencia serie rama capacitiva	$R_{fc,m}$	0.5 Ω
<i>Líneas y red equivalente (planta, no entran al C-Script)</i>		
Inductancia de línea del maestro	L_l	20 μ H
Resistencia de línea del maestro	R_l	0.01 Ω
Inductancia equivalente de red	L_{grid}	2.7 μ H
Resistencia equivalente de red	R_{grid}	0.01 Ω
<i>Carga RL trifásica (configuración del artículo base)</i>		
Resistencia de carga por fase	R_{load}	1.03 Ω
Inductancia de carga por fase	L_{load}	3.3 mH
<i>Pesos de la función de costo FCS-MPC</i>		
Peso de tensión en modo isla	λ_v^{isla}	1000
Peso de tensión en modo conectado a la red	λ_v^{grid}	100
Peso de corriente en modo conectado a la red	λ_i^{grid}	3000
Límite de corriente del lado inversor	$I_{max,m}$	250 A
Penalización de sobrecorriente (interna)	$K_{lim,m}$	10^9
<i>Sincronización SRF-PLL</i>		
Ganancia proporcional	$K_{p,PLL}$	0.4
Ganancia integral	$K_{i,PLL}$	18
Constante del filtro pasa bajos de potencias	τ_{pq}	20 ms
<i>Droop dinámico, estructura disponible e inactiva en la base</i>		
Ganancia droop $P-v$	$k_{p,droop}$	0
Ganancia droop $Q-\omega$	$k_{q,droop}$	0
<i>Detector de secuencia positiva SOGI-PSD</i>		
Ganancia de amortiguamiento del SOGI	k_{sogi}	$\sqrt{2} \approx 1.4142$
Variable de activación del PSD	<code>use_psd</code>	0 (desactivado)

Los valores del filtro son nominales de diseño. Los parámetros L_f y C_f de la Tabla 4.1 son nominales y el componente real no los conserva en servicio, discrepancia que da sentido físico al corrector de la Sección 4.6. En el inductor dominan la tolerancia de fabricación, la caída de permeabilidad con la temperatura y sobre todo la saturación magnética [37], mientras el condensador de película metalizada varía mucho menos [38, 39]. Compuestos, sitúan la banda de servicio en $K_{Lf} \in [0.5; 1.1]$ y $K_{Cf} \in [0.90; 1.10]$. El Apéndice A.8 desglosa cada mecanismo y la Sección 4.6.7 explica por qué la campaña recorre a propósito una banda mucho más ancha.

Sintonía del SRF-PLL. La sincronización emplea el lazo de seguimiento de fase en marco sincrónico (SRF-PLL) [25]. Linealizado alrededor del régimen sincronizado, con $v_q \approx v_{nom} \Delta\theta$ y $\omega(s) = \omega_{nom} + (K_{p,PLL} + K_{i,PLL}/s) v_q$, su lazo cerrado responde a la forma canónica de segundo orden,

$$\frac{\theta_{pll}(s)}{\theta_{grid}(s)} = \frac{v_{nom} K_{p,PLL} s + v_{nom} K_{i,PLL}}{s^2 + v_{nom} K_{p,PLL} s + v_{nom} K_{i,PLL}}. \quad (4.3)$$

Igualando el denominador a la forma estándar $s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2$ se obtienen las ganancias de diseño,

$$K_{p,PLL} = \frac{2\zeta\omega_n}{v_{nom}}, \quad K_{i,PLL} = \frac{\omega_n^2}{v_{nom}}. \quad (4.4)$$

La presencia de v_{nom} normaliza la ganancia del lazo respecto del nivel de tensión, de modo que ζ y ω_n quedan fijados por diseño y no dependen de la amplitud de operación.

Los dos parámetros libres se eligen por criterios físicos. El amortiguamiento se fija en $\zeta = 1/\sqrt{2}$, que da respuesta rápida y sin sobrepaso apreciable, porque el ángulo del PLL alimenta directamente las referencias del maestro en modo conectado a la red y de los esclavos en ambos modos, y una oscilación angular en cada transitorio se propagaría a ellas. La frecuencia natural se fija en $f_n = 10$ Hz como compromiso entre dos cotas, por abajo resincronizar en pocos ciclos de red, con $t_s \approx 4/(\zeta\omega_n) \approx 90$ ms, y por arriba quedar bajo la fundamental para atenuar el *ripple* de 100 Hz asociado a los desbalances. Con $v_{nom} = 220$ V resultan $K_{p,PLL} \approx 0.4$ y $K_{i,PLL} \approx 18$, los valores de la Tabla 4.1.

La sintonía respeta la jerarquía temporal de la plataforma. El PLL es más lento que el predictivo, que actúa cada $T_s = 100 \mu s$, y queda en el orden del filtro de potencias, $\tau_{pq} = 20$ ms. Su integrador se acota a ± 20 rad/s como anti-*windup* y solo opera en modo conectado a la red, porque en isla el maestro impone su ángulo interno θ_m .

Bloques implementados y no activos en las campañas. Tres elementos quedan implementados en el C-Script y verificados, pero **desactivados en todas las campañas de esta memoria**, porque su función pertenece a la capa de coordinación secundaria y el alcance declarado en el Capítulo 2 llega hasta el control primario. El primero es el detector de secuencia positiva SOGI-PSD, que ante desbalance entregaría al PLL la componente directa sin alterar su sintonía [25]. El segundo es el control *droop* que se formula a continuación. El tercero es el factor de escala de R_{fc} , cuya exclusión se argumenta en la Sección 4.6.2. Se documentan una sola vez, aquí, y no vuelven a mencionarse como opciones activas en el resto del trabajo.

Ganancias del control droop. La estructura de control *droop* está implementada en el C-Script mediante

$$v^{ref} = v_{nom} - k_p(P^{ref} - P_f), \quad \omega^{ref} = \omega_{nom} + k_q(Q^{ref} - Q_f), \quad (4.5)$$

donde P_f y Q_f son las potencias filtradas. Una parametrización inicial puede obtenerse a partir de desviaciones admisibles del 5 % en tensión y del 1 % en frecuencia,

$$k_p = \frac{0.05 v_{nom}}{P_{nom}}, \quad k_q = \frac{0.01 \omega_{nom}}{Q_{nom}}. \quad (4.6)$$

En las campañas ambas ganancias valen cero, según se declaró más arriba. El emparejamiento de potencia activa con amplitud y de reactiva con frecuencia sigue el convenio de la arquitectura de referencia [3] y no una relación universal, porque el acoplamiento dominante de la red condiciona la forma apropiada de la pendiente. Activarlo exigiría recalcular k_p y k_q con las potencias base de la carga y repetir la validación del reparto.

4.3. Representación matemática del sistema

La formulación se desarrolla en coordenadas estacionarias $\alpha\beta$. La transformada de Clarke lleva las tres magnitudes de fase a dos componentes ortogonales sin más hipótesis que la ausencia de secuencia homopolar, que un sistema de tres hilos garantiza, mientras el marco sincrónico dq añadiría una rotación por el ángulo estimado y con ella una dependencia del PLL. La elección tiene tres consecuencias aquí. Los ocho estados de conmutación son puntos fijos del plano, de modo que la evaluación de candidatos no arrastra el ángulo. El modelo del filtro conserva coeficientes constantes, sin los términos cruzados $\pm\omega L_f$ y $\pm\omega C_f$ que en dq harían depender la matriz de transición de la frecuencia estimada. Y el vector de entrada de la PINN se construye con magnitudes medidas y sus diferencias, que en $\alpha\beta$ dependen solo de los parámetros del filtro, mientras que en dq un error del PLL se confundiría con un desajuste paramétrico.

El marco dq se emplea allí donde sí aporta, que son las acciones integrales del Escenario 2. Una componente de 50 Hz es constante en dq , y un integrador solo anula el error de régimen frente a una señal constante, de manera que la memoria pasa a dq para integrar y vuelve a $\alpha\beta$ para actuar. La transformación de Clarke y la proyección de los estados de conmutación son comunes al maestro y a los esclavos, y solo cambian de nomenclatura según el convertidor [5, 25].

4.3.1. Convención de notación

La notación es común a los dos escenarios y se resume en la Tabla 4.2. Tres reglas la gobiernan. La negrita marca el carácter vectorial y denota el fasor espacial en coordenadas $\alpha\beta$, como en $\mathbf{i}_f$. El único acento empleado es el de $\hat{\mathbf{x}}$, que señala una magnitud calculada por un modelo y nunca medida, tanto si procede del predictor discreto como si la entrega la PINN. Cualquier otro calificador viaja en superíndices y subíndices.

Para la rama capacitiva se reserva una distinción adicional. $\mathbf{v}_C$ denota la tensión del condensador y $\mathbf{v}_c$ la tensión de la rama completa. Con $\mathbf{i}_c = \mathbf{i}_f - \mathbf{i}_o$, ambas se relacionan mediante

$$\mathbf{v}_c = \mathbf{v}_C + R_{fc,m} \mathbf{i}_c. \quad (4.7)$$

Tabla 4.2

CONVENCIÓN DE NOTACIÓN DE LOS CAPÍTULO 4 Y 5.

Marca	Significado
Carácter de la variable	
$\mathbf{x}$	Fasor espacial en $\alpha\beta$, de componentes x_α y x_β
x	Escalar, o componente aislada del fasor espacial
X	Valor RMS
x_{pk}	Valor máximo instantáneo, que en régimen sinusoidal vale $\sqrt{2} X$
$\mathbf{v}_C$	Tensión del condensador de la rama capacitiva
$\mathbf{v}_c$	Tensión de la rama capacitiva completa, incluida la caída en $R_{fc,m}$
Origen del valor	
$\mathbf{x}^{med}(k)$	Medida muestreada al inicio de la iteración k
$\hat{\mathbf{x}}(k+\ell)$	Magnitud calculada por un modelo y no medida, sea la predicción del modelo discreto al horizonte $k+\ell$ o la estimación entregada por la PINN
$\mathbf{x}^{ext}(k+\ell)$	Extrapolada y tratada como perturbación externa
$\mathbf{x}^{ref}$	Referencia o consigna que el control debe seguir
$\mathbf{u}^*$	Tensión óptima, solución del problema de minimización del costo
Procesamiento y límites	
$\mathbf{x}^{lp}$	Componente lenta, salida del filtro pasa-bajos
$\mathbf{x}^{hp}$	Componente rápida, complemento de la anterior
$\mathbf{x}^{eff}$	Valor efectivo del parámetro tras el reescalado de la PINN
$\mathbf{x}^{máx}$	Límite superior impuesto por el reparto de potencia
$P_{m,f}^{ref}, Q_{m,f}^{ref}$	Referencias supervisoras filtradas del maestro
Índices	
m, s	Maestro y esclavo genérico
$r \in \{0, \dots, 7\}$	Estado de conmutación candidato del inversor
α, β	Componentes del marco estacionario
$\xi \in \{\alpha, \beta\}$	Componente genérica, empleada solo en el SOGI-PSD
Operadores	
dx/dt	Derivada temporal. El punto sobre la variable no se emplea
$\text{sat}_{[a,b]}(\cdot)$	Recorte de una variable escalar al intervalo $[a, b]$. Devuelve a por debajo, b por encima y el propio argumento dentro
$\mathbf{M} \succ 0$	Matriz definida positiva, es decir $\mathbf{w}^T \mathbf{M} \mathbf{w} > 0$ para todo $\mathbf{w} \neq \mathbf{0}$. El símbolo distingue esta relación entre matrices de la desigualdad escalar $>$
$\text{proj}_{\mathcal{C}}(\cdot)$	Proyección euclidiana sobre el conjunto convexo $\mathcal{C}$. Con $\mathcal{C} = \mathcal{U}_{CCS}$ lleva el vector de tensión al punto admisible más próximo
$\text{atan2}(y, x)$	Argumento del par ordenado en los cuatro cuadrantes

4.3.2. Transformación de Clarke

Para reducir el sistema trifásico a dos componentes ortogonales estacionarias se usa la transformación de Clarke con factor de escala $2/3$,

$$\begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix}. \quad (4.8)$$

Esta convención se mantiene en todo el modelo, cálculo de potencias en $\alpha\beta$, generación de referencias y evaluación de los estados candidatos del FCS-MPC. En el maestro se aplica a $\mathbf{i}_{f,m}$, $\mathbf{v}_{c,m}$, $\mathbf{i}_{o,m}$, $\mathbf{v}_{PCC}$ y $\mathbf{v}_{grid}$, en cada esclavo, a $\mathbf{i}_{f,s}$, $\mathbf{v}_{C,s}$ e $\mathbf{i}_{o,s}$.

La transformación de Park es la que introduce una orientación, porque rota el plano un ángulo θ que hay que suministrar,

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix}. \quad (4.9)$$

En modo conectado a la red ese ángulo lo entrega el PLL de la Sección 4.4.2, con lo que el eje d queda alineado con el vector de tensión y una magnitud sinusoidal de 50 Hz se convierte en una constante. Esa es la única razón por la que los lazos integrales de las Secciones 4.5.4 y 4.5.5 se formulan en dq y no en $\alpha\beta$, un integrador tiene ganancia infinita en continua y solo puede anular un error que sea constante en régimen. El resto del control, incluida la predicción y la función de costo, permanece en el marco estacionario.

4.3.3. Estados de conmutación del inversor

Cada VSI de dos niveles admite ocho estados, definidos por la terna binaria $[S_a, S_b, S_c]$ con $S_x \in \{0, 1\}$. La proyección del candidato r sobre el marco $\alpha\beta$ es

$$u_{\alpha,r} = \frac{2}{3} (S_{a,r} - \frac{1}{2} S_{b,r} - \frac{1}{2} S_{c,r}) V_{dc}^{med}, \quad u_{\beta,r} = \frac{2}{3} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} (S_{b,r} - S_{c,r}) \right) V_{dc}^{med}, \quad (4.10)$$

con el vector aplicado $\mathbf{u}_r = [u_{\alpha,r} \ u_{\beta,r}]^\top$. La estructura es idéntica para el esclavo s sustituyendo V_{dc}^{med} por su bus propio $V_{dc,s}^{med}$ y agregando el subíndice s . En la implementación los ocho estados se evalúan mediante arreglos tabulados, lo que evita recalcular la combinación binaria en cada iteración del lazo de optimización.

4.3.4. Extrapolación sinusoidal en coordenadas $\alpha\beta$

Para proyectar una variable sinusoidal medida hacia un horizonte futuro se usa el avance angular esperado en n periodos de muestreo,

$$\begin{bmatrix} x_\alpha^{ext}(k+n) \\ x_\beta^{ext}(k+n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(n\omega T_s) & -\sin(n\omega T_s) \\ \sin(n\omega T_s) & \cos(n\omega T_s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_\alpha^{med}(k) \\ x_\beta^{med}(k) \end{bmatrix}. \quad (4.11)$$

En lo que sigue el superíndice ext indica que la variable fue proyectada al horizonte correspondiente. La validez de esta proyección, que supone amplitud constante y giro uniforme durante n periodos de muestreo, se discute donde se emplea por primera vez sobre una referencia, en la Sección 4.4.5.

4.4. Escenario 1, desarrollo progresivo de la arquitectura maestro–esclavo

El Escenario 1 comenzó con una etapa preliminar de un solo convertidor maestro, no como escenario independiente sino como validación del predictor, la lógica de modo y las referencias que después se conservaron [3]. Estudiarlo aislado permitió separar los errores del lazo predictivo de los que introducen la coordinación y el reparto, algo necesario porque es la única unidad *grid-forming* y la única cuyo modelo corrige la PINN.

Actuación directa por conjunto finito. En este escenario **no existe etapa de modulación**. Donde un esquema clásico entrega una tensión de referencia continua que un modulador traduce a pulsos contra una portadora, aquí la acción de control es el estado de conmutación. En cada paso el controlador evalúa los ocho estados admisibles, $\mathbf{S} = [S_a, S_b, S_c] \in \{0, 1\}^3$, y aplica a las compuertas el de menor costo. De ahí dos consecuencias. La conmutación es aperiódica, con frecuencia por dispositivo variable con el punto de operación y acotada por $1/(2T_s) = 5$ kHz por rama, de modo que no debe confundirse f_s , la tasa a la que el controlador decide, con $f_{sw,eff}$, la frecuencia a la que el semiconductor conmuta. Y el espectro es disperso, porque sin portadora el contenido de conmutación se reparte en una banda en torno a $1/T_s$, lo que incrementa el *ripple* sobre v_C y justifica medir los errores sobre la fundamental y en ventanas comunes. La actividad efectiva se calcula desde las compuertas finales, contando las transiciones $N_{bordes,x}$ de la fase x en una ventana $T_{ventana}$ que abarque varios ciclos fundamentales [4, 5],

$$f_{sw,eff,x} = \frac{N_{bordes,x}}{2T_{ventana}}, \quad x \in \{a, b, c\}. \quad (4.12)$$

La actuación directa desplaza el costo desde el modulador dedicado hacia el cómputo por paso, presupuestado en la Sección 4.7.2.

4.4.1. Estructura del bloque de control y selección de modo

Entradas del bloque y topología. La planta PLECS conserva la topología de la Sección 4.2.1, con V_{dc} , VSI de dos niveles, filtro LC, línea, carga RL y red equivalente. El C-Script del maestro recibe veintisiete entradas, siete ternas trifásicas medidas y seis escalares de consigna, modo y habilitación, es decir $7 \times 3 + 6 = 27$ puertos del bloque. Solo cuatro ternas y los escalares intervienen en el predictor. Las tres restantes sirven para construir internamente las potencias de carga y de red que alimentan la rutina de reparto de la Sección 4.4. El orden de los puertos y sus nombres se listan en el Apéndice A.5. Los veintisiete puertos son señales externas del bloque PLECS, mientras las veintiséis o veintiocho entradas de la PINN son características construidas internamente (Sección 4.6). Clarke, memoria de un paso, diferencias divididas por T_s y error de observación capacitivo no añaden puertos. En isla se incorporan además P_{filt} y Q_{filt} , de donde proceden las dos entradas adicionales. Toda señal trifásica se transforma a $\alpha\beta$ con la transformada de Clarke de amplitud invariante definida en la ecuación (4.8), y toda reconstrucción $\alpha\beta \rightarrow abc$ usa su inversa.

Selector de modo y resincronización. El comando `gridcmd` fija el régimen,

$$G(k) = \begin{cases} 1, & \text{gridcmd}(k) > 0.5, \\ 0, & \text{en caso contrario,} \end{cases} \quad (4.13)$$

y gobierna el ángulo interno, las referencias y la composición del costo. El régimen no se fija como caso base, el mismo bloque opera en isla o conectado a la red según el ensayo. Para evitar saltos en la transición isla→grid, el ángulo del PLL se resincroniza con la fase del PCC,

$$\theta_{pll}(k) = \text{atan2}\left(v_{PCC,\beta}^{med}(k), v_{PCC,\alpha}^{med}(k)\right), \quad (4.14)$$

solo en la transición $G(k) = 1$, $G(k-1) = 0$ y con $|\mathbf{v}_{PCC}^{med}| > 1 \text{ V}$.

4.4.2. Sincronización y detección de secuencia positiva

Detector de secuencia positiva SOGI-PSD. Con el detector habilitado, cada componente $\xi \in \{\alpha, \beta\}$ del PCC se procesa por un SOGI con estados $(v_{\xi}^{sogi}, qv_{\xi}^{sogi})$, discretizados por Euler hacia adelante,

$$v_{\xi}^{sogi}(k+1) = v_{\xi}^{sogi}(k) + T_s \left[k_{sogi} \omega_{nom} \left(v_{PCC,\xi}^{med}(k) - v_{\xi}^{sogi}(k) \right) - \omega_{nom} qv_{\xi}^{sogi}(k) \right], \quad (4.15)$$

$$qv_{\xi}^{sogi}(k+1) = qv_{\xi}^{sogi}(k) + T_s \omega_{nom} v_{\xi}^{sogi}(k). \quad (4.16)$$

La salida v_{ξ}^{sogi} reproduce la entrada en fase y qv_{ξ}^{sogi} la entrega en cuadratura, lo que permite reconstruir la secuencia positiva

$$v_{PCC,\alpha}^+ = \frac{1}{2} \left(v_{\alpha}^{sogi} - qv_{\beta}^{sogi} \right), \quad v_{PCC,\beta}^+ = \frac{1}{2} \left(v_{\beta}^{sogi} + qv_{\alpha}^{sogi} \right). \quad (4.17)$$

La entrada del PLL es $\mathbf{v}_{PLL} = \mathbf{v}_{PCC}^+$ con el detector habilitado y $\mathbf{v}_{PLL} = \mathbf{v}_{PCC}^{med}$ en caso contrario. Con $k_{sogi} = \sqrt{2}$ el filtro alcanza amortiguamiento crítico y cancela la secuencia negativa, suprimiendo el *ripple* de $2\omega_{nom}$ sobre ω_{pll} ante desbalance. En todos los ensayos de este capítulo el detector se mantiene *desactivado*, por las razones que se exponen al cierre de la sección.

Sincronización SRF-PLL. La proyección sobre el eje q sincrónico da el error

$$v_q^{pll}(k) = -v_{PLL,\alpha}(k) \sin \theta_{pll}(k) + v_{PLL,\beta}(k) \cos \theta_{pll}(k), \quad (4.18)$$

que actualiza un integrador saturado y el ángulo,

$$\xi_{pll}(k+1) = \xi_{pll}(k) + K_{i,PLL} v_q^{pll}(k) T_s, \quad \xi_{pll} \in [-20, 20], \quad (4.19)$$

$$\begin{aligned} \omega_{pll}(k) &= \omega_{nom} + K_{p,PLL} v_q^{pll}(k) + \xi_{pll}(k), \\ \theta_{pll}(k+1) &= \theta_{pll}(k) + \omega_{pll}(k) T_s, \quad \theta_{pll} \in [0, 2\pi). \end{aligned} \quad (4.20)$$

Cada actualización angular se representa por su equivalente en $[0, 2\pi)$, y se excluye 2π porque coincide con la fase cero. La integración solo se habilita en modo conectado a la red. La sintonía $K_{p,PLL} = 0.4$, $K_{i,PLL} = 18$ corresponde a $\zeta = 0.707$, $\omega_n = 2\pi \cdot 10 \text{ rad/s}$ y $v_{nom} = 220 \text{ V}$ (Sección 4.2.2).

4.4.3. Potencias filtradas y referencias de potencia

Potencias propias filtradas y referencias dinámicas. La potencia instantánea inyectada por el maestro se evalúa con su tensión de condensador y su corriente de filtro, en $\alpha\beta$,

$$P^{med} = \frac{3}{2} \left(v_{C,\alpha}^{med;med} i_{f,\alpha}^{med} + v_{C,\beta}^{med;med} i_{f,\beta}^{med} \right), \quad Q^{med} = \frac{3}{2} \left(v_{C,\beta}^{med;med} i_{f,\alpha}^{med} - v_{C,\alpha}^{med;med} i_{f,\beta}^{med} \right). \quad (4.21)$$

El factor $\frac{3}{2}$ es consistente con la transformada de Clarke de amplitud invariante. Ambas se filtran con un filtro pasa-bajos (LPF, *Low-Pass Filter*) de primer orden

$$X_{filt}(k+1) = \alpha_{pq} X_{filt}(k) + (1 - \alpha_{pq}) X^{med}(k), \quad \alpha_{pq} = \frac{\tau_{pq}}{\tau_{pq} + T_s}, \quad (4.22)$$

con $\tau_{pq} = 20$ ms (corte ≈ 8 Hz), que atenúa el *ripple* de 100 Hz. Ese *ripple* tiene un origen preciso. La potencia instantánea de una fase vale $v i = VI [\cos \varphi + \cos(2\omega_{nom}t - \varphi)]$, de modo que **cada fase pulsa por sí sola al doble de la fundamental**. En un conjunto trifásico equilibrado de secuencia positiva las tres pulsaciones están desfasadas 120° entre sí y se cancelan, y la suma resulta constante. Cualquier desequilibrio deja un residuo a $2\omega_{nom}$, esto es 100 Hz, y en esta plataforma lo producen el desequilibrio entre condensadores cuando la campaña los perturba de forma independiente, el error residual de ángulo del PLL durante los transitorios y el *ripple* de conmutación, que no reparte energía por igual entre las tres ramas. La constante elegida coincide además con un periodo de la fundamental, que es la escala natural para promediar esa pulsación.

4.4.4. Modelo discreto y predicción

Modelo discreto y predicción común. El predictor trabaja sobre el filtro LC, mientras la línea y la red quedan en la planta. Aplicando la convención de la ecuación (4.7), el modelo continuo es

$$\frac{d\mathbf{i}_f}{dt} = \frac{\mathbf{u} - R_f \mathbf{i}_f - \mathbf{v}_C - R_{fc,m}(\mathbf{i}_f - \mathbf{i}_o)}{L_f}, \quad \frac{d\mathbf{v}_C}{dt} = \frac{\mathbf{i}_f - \mathbf{i}_o}{C_f}. \quad (4.23)$$

El término $R_{fc,m}(\mathbf{i}_f - \mathbf{i}_o)$ es la caída de la resistencia serie de la rama. No constituye un estado adicional, pero sí forma parte de la tensión que se opone a la acción del inversor en la dinámica de $\mathbf{i}_f$. La discretización por Euler hacia adelante define

$$a_i = 1 - \frac{R_f T_s}{L_f}, \quad b_i = \frac{T_s}{L_f}, \quad b_c = \frac{T_s}{C_f}. \quad (4.24)$$

Al inicio del periodo el inversor ya aplica los pulsos previos (S_a, S_b, S_c), que definen $\mathbf{u}_{prev}(k)$,

$$u_{prev,\alpha}(k) = \frac{2}{3} \left(S_a - \frac{1}{2} S_b - \frac{1}{2} S_c \right) V_{dc}^{med}, \quad u_{prev,\beta}(k) = \frac{1}{\sqrt{3}} (S_b - S_c) V_{dc}^{med}. \quad (4.25)$$

Con ello se predicen las variables comunes a todos los candidatos (compensación de retardo). Corriente de filtro,

$$\hat{i}_{f,\alpha}(k+1) = a_i i_{f,\alpha}^{med}(k) + b_i \left[u_{prev,\alpha}(k) - v_{C,\alpha}^{med}(k) - R_{fc,m} \left(i_{f,\alpha}^{med}(k) - i_{o,\alpha}^{med}(k) \right) \right], \quad (4.26)$$

$$\hat{i}_{f,\beta}(k+1) = a_i i_{f,\beta}^{med}(k) + b_i \left[u_{prev,\beta}(k) - v_{C,\beta}^{med}(k) - R_{fc,m} \left(i_{f,\beta}^{med}(k) - i_{o,\beta}^{med}(k) \right) \right], \quad (4.27)$$

tensión de condensador,

$$\widehat{v}_{C,\alpha}(k+1) = v_{C,\alpha}^{med}(k) + b_c \left(i_{f,\alpha}^{med}(k) - i_{o,\alpha}^{med}(k) \right), \quad (4.28)$$

$$\widehat{v}_{C,\beta}(k+1) = v_{C,\beta}^{med}(k) + b_c \left(i_{f,\beta}^{med}(k) - i_{o,\beta}^{med}(k) \right). \quad (4.29)$$

La corriente de salida se extrapola a $k+1$ y $k+2$ por rotación sinusoidal según la ecuación (4.11), y la tensión del condensador a $k+2$ resulta

$$\widehat{v}_{C,\alpha}(k+2) = \widehat{v}_{C,\alpha}(k+1) + b_c \left(\widehat{i}_{f,\alpha}(k+1) - i_{o,\alpha}^{ext}(k+1) \right), \quad (4.30)$$

$$\widehat{v}_{C,\beta}(k+2) = \widehat{v}_{C,\beta}(k+1) + b_c \left(\widehat{i}_{f,\beta}(k+1) - i_{o,\beta}^{ext}(k+1) \right). \quad (4.31)$$

La caída $R_{fc,m}(\mathbf{i}_f - \mathbf{i}_o)$ aparece dentro de la predicción de corriente en cada horizonte, y no en la actualización del estado capacitivo, que conserva la forma directa de las ecuaciones (4.28) y (4.30). La Sección 4.4.8 demuestra que esta realización y la propagación incremental de la tensión de rama son equivalentes.

4.4.5. Referencias por modo de operación

Referencias por modo. La cadena de predicción del filtro LC, ecuaciones (4.26)–(4.31) para $\widehat{\mathbf{i}}_f$ y $\widehat{\mathbf{v}}_c$, es idéntica en ambos modos, porque la planta del maestro no cambia con el régimen de operación. Lo único que distingue al modo isla del modo conectado a la red es la referencia que persigue el costo y los pesos que lo componen. En *modo isla* ($G = 0$) el maestro es *grid-forming* y sintetiza la referencia de tensión a $k+3$ desde su ángulo interno,

$$v_{C,\alpha}^{ref}(k+3) = v^{ref}(k) \cos\left(\theta_m(k) + 3\omega^{ref}(k)T_s\right), \quad (4.32)$$

$$v_{C,\beta}^{ref}(k+3) = v^{ref}(k) \sin\left(\theta_m(k) + 3\omega^{ref}(k)T_s\right), \quad (4.33)$$

con el término de corriente inhabilitado. En *modo conectado a la red* ($G = 1$) el maestro es *grid-following* y aplica la cadena de tres pasos del artículo base. Primero, la referencia de corriente de salida desde las consignas de potencia, usando $\mathbf{v}_C^{med}$ como fasor,

$$i_{o,\alpha}^{ref}(k) = \frac{2}{3} \frac{v_{C,\alpha}^{med} P^{ref} + v_{C,\beta}^{med} Q^{ref}}{(v_{C,\alpha}^{med})^2 + (v_{C,\beta}^{med})^2}, \quad (4.34)$$

$$i_{o,\beta}^{ref}(k) = \frac{2}{3} \frac{v_{C,\beta}^{med} P^{ref} - v_{C,\alpha}^{med} Q^{ref}}{(v_{C,\alpha}^{med})^2 + (v_{C,\beta}^{med})^2}, \quad (4.35)$$

con cota inferior sobre el denominador para evitar singularidades. (En la Sección 4.4 estas consignas P^{ref} , Q^{ref} se reemplazan por sus versiones acotadas por el reparto.) Segundo, la compensación de la corriente capacitiva ideal da la referencia del lado inversor

$$i_{f,\alpha}^{ref}(k) = i_{o,\alpha}^{ref}(k) - \omega_{nom} C_f v_{C,\beta}^{med}(k), \quad i_{f,\beta}^{ref}(k) = i_{o,\beta}^{ref}(k) + \omega_{nom} C_f v_{C,\alpha}^{med}(k), \quad (4.36)$$

cuya versión con *damping* se introduce en la Sección 4.4. Tercero, la referencia de corriente se extrapola a $k+2$ y la de tensión a $k+3$ desde el PCC medido, por rotación sinusoidal,

$$i_{f,\alpha}^{ref}(k+2) = i_{f,\alpha}^{ref}(k) \cos(2\omega_{nom}T_s) - i_{f,\beta}^{ref}(k) \sin(2\omega_{nom}T_s), \quad (4.37)$$

$$i_{f,\beta}^{ref}(k+2) = i_{f,\alpha}^{ref}(k) \sin(2\omega_{nom}T_s) + i_{f,\beta}^{ref}(k) \cos(2\omega_{nom}T_s), \quad (4.38)$$

$$v_{C,\alpha}^{ref}(k+3) = v_{PCC,\alpha}^{med}(k) \cos(3\omega_{nom}T_s) - v_{PCC,\beta}^{med}(k) \sin(3\omega_{nom}T_s), \quad (4.39)$$

$$v_{C,\beta}^{ref}(k+3) = v_{PCC,\alpha}^{med}(k) \sin(3\omega_{nom}T_s) + v_{PCC,\beta}^{med}(k) \cos(3\omega_{nom}T_s). \quad (4.40)$$

Así la fase impuesta se alinea con la red sin un PLL adicional en el cálculo de la referencia.

4.4.6. Función de costo y selección del estado de conmutación

Predicción por candidato y función de costo. Para cada estado $r \in \{0, \dots, 7\}$ con vector $\mathbf{u}_r$ definido en la ecuación (4.10), la corriente de filtro predicha es

$$\begin{aligned} \hat{i}_{f,\alpha,r}(k+2) &= a_i \hat{i}_{f,\alpha}(k+1) \\ &+ b_i \left[u_{\alpha,r} - \hat{v}_{C,\alpha}(k+1) - R_{fc,m} \left(\hat{i}_{f,\alpha}(k+1) - i_{o,\alpha}^{ext}(k+1) \right) \right], \end{aligned} \quad (4.41)$$

$$\begin{aligned} \hat{i}_{f,\beta,r}(k+2) &= a_i \hat{i}_{f,\beta}(k+1) \\ &+ b_i \left[u_{\beta,r} - \hat{v}_{C,\beta}(k+1) - R_{fc,m} \left(\hat{i}_{f,\beta}(k+1) - i_{o,\beta}^{ext}(k+1) \right) \right]. \end{aligned} \quad (4.42)$$

y la tensión del condensador a $k+3$, que conserva la misma forma de los dos horizontes anteriores,

$$\hat{v}_{C,\alpha,r}(k+3) = \hat{v}_{C,\alpha}(k+2) + b_c \left(\hat{i}_{f,\alpha,r}(k+2) - i_{o,\alpha}^{ext}(k+2) \right), \quad (4.43)$$

$$\hat{v}_{C,\beta,r}(k+3) = \hat{v}_{C,\beta}(k+2) + b_c \left(\hat{i}_{f,\beta,r}(k+2) - i_{o,\beta}^{ext}(k+2) \right). \quad (4.44)$$

El costo implementado combina seguimiento de tensión, seguimiento de corriente y límite de corriente,

$$g_m(r) = \lambda_v^{eff} g_v(r) + \lambda_i^{eff} g_{if}(r) + g_{ilim}(r), \quad (4.45)$$

$$g_v(r) = (v_{C,\alpha}^{ref}(k+3) - \hat{v}_{C,\alpha,r}(k+3))^2 + (v_{C,\beta}^{ref}(k+3) - \hat{v}_{C,\beta,r}(k+3))^2, \quad (4.46)$$

$$g_{if}(r) = (i_{f,\alpha}^{ref}(k+2) - \hat{i}_{f,\alpha,r}(k+2))^2 + (i_{f,\beta}^{ref}(k+2) - \hat{i}_{f,\beta,r}(k+2))^2, \quad (4.47)$$

$$g_{ilim}(r) = \begin{cases} 10^9, & \hat{i}_{f,\alpha,r}^2(k+2) + \hat{i}_{f,\beta,r}^2(k+2) > I_{max,m}^2, \\ 0, & \text{en caso contrario.} \end{cases} \quad (4.48)$$

El término g_{ilim} no pondera, descarta. Su valor es una barrera de magnitud muy superior a cualquier costo de seguimiento realista, de modo que ningún candidato que exceda $I_{max,m}$ puede ganar la comparación mientras exista uno admisible. El límite se fija en 250 A de valor máximo instantáneo, y su dimensionamiento admite dos comprobaciones independientes. La carga de estudio demanda 150.5 A *peak* cuando una sola unidad la cubre entera, de modo que el límite queda un 66 % por encima de esa exigencia. Y la mayor desviación que el maestro alcanza en toda la campaña de consignas, incluidos los niveles supranominales y las condiciones perturbadas, es de 145.4 A, de manera que el límite está a 1.7 veces del peor caso medido. Lo que importa para la validez de la comparación no es el valor concreto sino esa holgura, porque **la barrera no llega a actuar en ninguna corrida** y cualquier otro valor suficientemente holgado entregaría los mismos resultados. Elegirlo más ajustado la haría actuar en régimen y contaminaría justamente lo que la campaña mide.

Los pesos efectivos dependen del modo,

$$\lambda_v^{eff} = \begin{cases} \lambda_v^{isla}, & G = 0 \\ \lambda_v^{grid}, & G = 1 \end{cases} \quad \lambda_i^{eff} = \begin{cases} 0, & G = 0 \\ \lambda_i^{grid}, & G = 1. \end{cases} \quad (4.49)$$

El uso de dos pesos de tensión independientes, en lugar de un factor κ_g , mantiene la relevancia del término de tensión en modo conectado a la red y simplifica la trazabilidad del ajuste. El estado óptimo $r^{ref} = \arg \min_r g_m(r)$ fija el estado de conmutación $(S_{a,r^{ref}}, S_{b,r^{ref}}, S_{c,r^{ref}})$, cuyos pulsos de disparo persisten hasta el siguiente periodo.

4.4.7. Elección de los pesos de la función de costo

Los valores adoptados, $\lambda_v^{isla} = 1000$, $\lambda_v^{grid} = 100$ y $\lambda_i^{grid} = 3000$, parecen tres parámetros libres, pero solo uno lo es. En modo isla, con $G = 0$, el peso es irrelevante fuera de la región de la barrera,

$$\arg \min_r \lambda_v^{isla} g_v(r) = \arg \min_r g_v(r) \quad \text{para todo } \lambda_v^{isla} > 0, \quad (4.50)$$

porque escalar por una constante positiva no mueve el mínimo sobre un conjunto finito. Su único papel es dejar la barrera $g_{ilim} = 10^9$ seis órdenes de magnitud por encima de cualquier costo de seguimiento realista. En modo conectado a la red el par $(\lambda_v^{grid}, \lambda_i^{grid})$ tiene también un solo grado de libertad efectivo,

$$\Lambda = \frac{\lambda_i^{grid}}{\lambda_v^{grid}} = \frac{3000}{100} = 30, \quad \Lambda_{norm} = \left(\frac{|v_C|_{nom}}{|i_f|_{nom}} \right)^2 = \left(\frac{220 \text{ V}}{66.9 \text{ A}} \right)^2 = 10.8, \quad (4.51)$$

donde Λ_{norm} fija el orden de magnitud por conmensurabilidad, ya que el costo suma un término en V^2 y otro en A^2 . El valor adoptado pondera la corriente un factor 2.8 por encima, coherente con que en ese modo la corriente de salida es el objetivo y la tensión del condensador el regularizador. Un barrido sobre el propio modelo, en el Apéndice A.7.2, confirma la invariancia en isla y muestra que en modo conectado a la red el error varía un 2.0% al recorrer Λ entre 3 y 300, de modo que el desempeño queda gobernado por la fidelidad del modelo y no por el ajuste de los pesos.

El peso de conmutación se anula, $\lambda_{sw} = 0$, porque penalizar el número de conmutaciones convertiría la frecuencia en variable controlada y haría circular la comparación del Capítulo 5, ya que la portadora del Escenario 2 se fija a partir de la frecuencia efectiva medida en el Escenario 1. La renuncia tiene un costo declarado en la Sección 4.8, el esquema no gestiona pérdidas de conmutación.

Salidas del bloque. Las salidas del C-Script no se documentan exhaustivamente, pues su selección depende de lo que se desee observar en cada ensayo. Las relevantes para el control y para las figuras son la referencia de tensión del condensador $v_C^{ref}(k+3)$ y la referencia de corriente del lado inversor $i_f^{ref}(k+2)$ (en modo conectado a la red) o la de corriente de salida i_o^{ref} , junto con las trayectorias predichas $\hat{v}_C(k+3)$ e $\hat{i}_f(k+2)$ del vector seleccionado, que el convertidor efectivamente realiza. Estas permiten contrastar referencia contra magnitud construida sin reconstruir la cadena predictiva fuera del bloque.

El desarrollo completo de esta decisión de alcance, con su encaje en la literatura de identificación informada por física y las pruebas funcionales realizadas, se conserva en el Apéndice A.7.1, junto con la indicación de cómo rehabilitar los dos bloques.

4.4.8. Implementación maestro–esclavo y operación dual

Validado el maestro, el Escenario 1 se completa con dos esclavos de filtro LCL y bus de continua propio. En modo conectado a la red todos los convertidores son *grid-following*, y en isla el maestro es *grid-forming* mientras los esclavos permanecen sincronizados al PCC como unidades semi-despachables. Esta etapa incorpora la compensación capacitiva del maestro con su resistencia de rama, una asignación nominal por cuotas y una saturación asociada al límite de corriente de cada convertidor. Es la validación previa a la entrada de la PINN, porque define la coordinación y el balance de potencia en el PCC que el corrector deberá preservar, con las variables medidas, calculadas, extrapoladas y predichas separadas para que ninguna inconsistencia contamine el conjunto de entrenamiento.

Por qué el corrector aprendido se restringe al maestro. Los esclavos operan con FCS-MPC nominal, sin corrector aprendido, por tres razones. El maestro es la única unidad *grid-forming* y en isla su predictor sostiene la referencia de toda la microrred. La dinámica del esclavo está dominada por $L_{f,s}$ y su rama capacitiva tiene amortiguamiento pasivo. Y un solo corrector mantiene interpretable la comparación pareada, que con dos combinaría ambos efectos en el PCC. La restricción vale para los Escenarios 1 y 2, que son los que este capítulo formula. La Sección 5.10 levanta esa limitación como extensión, con una red propia en cada esclavo.

Configuración del caso base. Las Tablas 4.3 y 4.4 resumen los parámetros eléctricos, de control y lógicos activos. El bus DC es 800 V y la carga del artículo base ($R_{load} = 1.03 \Omega$, $L_{load} = 3.3 \text{ mH}$) impone el caso de mayor exigencia de corriente. Los bloques de apoyo conservan el estado que fija la Sección 4.4.7. El modo de operación G *no* se fija como caso base, es un parámetro del ensayo, y las mismas consignas se interpretan según el régimen.

Tabla 4.3
PARÁMETROS ELÉCTRICOS ACTIVOS DEL ESCENARIO 1.

Parámetro	Símbolo	Valor
Valor máximo instantáneo nominal fase-neutro	v_{nom}	220 V
Bus DC maestro y esclavos	$V_{dc}, V_{dc,s}$	800 V
Capacitancia de bus DC	C_{dc}	2200 μ F
<i>Filtro LC del maestro</i>		
Inductancia / resistencia serie	L_f / R_f	3 mH / 0.012 Ω
Capacitancia / damping	$C_f / R_{fc,m}$	500 μ F / 0.5 Ω
<i>Filtro LCL de cada esclavo</i>		
Inductancia / resistencia lado inversor	$L_{f,s} / R_{f,s}$	3.3 mH / 0.012 Ω
Capacitancia central / damping	$C_{f,s} / R_{fc,s}$	300 μ F / 2 Ω
Inductancia lado red	$L_{f,so}$	200 μ H
Línea del esclavo	$L_{l,s} / R_{l,s}$	20 μ H / 0.01 Ω
<i>Carga y red</i>		
Carga RL por fase	R_{load} / L_{load}	1.03 Ω / 3.3 mH
Red equivalente	L_{grid} / R_{grid}	2.7 μ H / 0.01 Ω

Tabla 4.4
PESOS FCS-MPC, SINCRONIZACIÓN Y PARÁMETROS LÓGICOS DEL ESCENARIO 1.

Parámetro	Símbolo	Valor
Peso de tensión del maestro (isla / red)	$\lambda_{v,m}^{isla} / \lambda_{v,m}^{grid}$	1000 / 100
Peso de corriente del maestro en modo conectado a la red	$\lambda_{i,m}^{grid}$	3000
Límite de corriente del maestro	$I_{max,m}$	250 A
Peso de corriente de cada esclavo	$\lambda_{i,s}$	3000
Límite de corriente de cada esclavo	$I_{max,s}$	100 A
Ganancias SRF-PLL	$K_{p,PLL} / K_{i,PLL}$	0.4 / 18
LPF de potencias (maestro / esclavo)	$\tau_{pq} / \tau_{pq,s}$	20 ms / 20 ms
Ganancia SOGI	k_{sogi}	$\sqrt{2}$
Variable PSD (maestro / esclavos)	<code>use_psd</code> / <code>use_psd_s</code>	0 / 0
Número de esclavos activos	N_{slaves}	2
Fracción de cuota del maestro	γ_m	0.5

Consignas de potencia. Las consignas se eligen como la cuota de potencia que cada convertidor debe cubrir de la carga nominal vista desde el PCC, $P_{load} \approx 35.01$ kW y $Q_{load} \approx 35.24$ kVAr, con factor de potencia $\cos \varphi \approx 0.70$ inductivo. Con la fracción del maestro $\gamma_m = 0.5$ y $N_{slaves} = 2$, al maestro le corresponde la mitad y a cada esclavo un cuarto. La Tabla 4.5 lista los valores y los instantes de escalón, desfasados para evitar transitorios simultáneos. En modo conectado a la red, $P_{s,grid}^{ref}$ y $Q_{s,grid}^{ref}$ son las referencias externas de cada esclavo, mientras en isla cada uno las recalcula desde el balance del PCC.

Tabla 4.5

CONSIGNAS DE POTENCIA DEL ESCENARIO 1 (CUOTA DEL REQUERIMIENTO DEL PCC).

Variable	Valor final	Instante de escalón
P_m^{ref} / Q_m^{ref}	17 505 W / 17 620 VAr	$t = 0.08 \text{ s} / t = 0.06 \text{ s}$
$P_{s1}^{ref} / Q_{s1}^{ref}$	8752.5 W / 8810 VAr	<i>Ambas</i> , $t = 0.10 \text{ s}$
$P_{s2}^{ref} / Q_{s2}^{ref}$	8752.5 W / 8810 VAr	<i>Ambas</i> , $t = 0.12 \text{ s}$

Topología extendida y entradas del esclavo. La planta conserva el lado maestro hasta el PCC y agrega dos VSI con filtro LCL. Cada esclavo distingue tres ramas, la del lado inversor, la del capacitor central con su resistencia de rama, y la del lado red. Las dos últimas inductancias en serie, la del filtro de salida y la de línea, se agrupan en el bloque porque el predictor solo ve su suma,

$$L_{out,s} = L_{f,so} + L_{l,s}, \quad R_{out,s} = R_{f,s} + R_{l,s}. \quad (4.52)$$

La agrupación es interna al predictor y no altera la planta simulada. A diferencia del maestro, el esclavo tiene una dinámica adicional de corriente de salida entre el capacitor y el PCC, por lo que $i_{o,s}$ sí es estado de su predictor. El bloque recibe veintisiete entradas, detalladas en el Apéndice A.5, y *ninguna potencia entra construida* porque todas se calculan dentro de cada C-Script a partir de las mediciones.

Construcción interna de las potencias. Tanto el maestro como los esclavos construyen las potencias del PCC dentro del bloque, en $\alpha\beta$ y con el mismo factor $\frac{3}{2}$ de la ecuación (4.21). La potencia de la carga se obtiene de la tensión del PCC y la corriente de carga medida,

$$P_{load} = \frac{3}{2} \left(v_{PCC,\alpha}^{med} i_{load,\alpha}^{med} + v_{PCC,\beta}^{med} i_{load,\beta}^{med} \right), \quad Q_{load} = \frac{3}{2} \left(v_{PCC,\beta}^{med} i_{load,\alpha}^{med} - v_{PCC,\alpha}^{med} i_{load,\beta}^{med} \right), \quad (4.53)$$

y la potencia de la red, de la tensión y corriente de la rama de red,

$$P_{grid} = \frac{3}{2} \left(v_{grid,\alpha}^{med} i_{grid,\alpha}^{med} + v_{grid,\beta}^{med} i_{grid,\beta}^{med} \right), \quad Q_{grid} = \frac{3}{2} \left(v_{grid,\beta}^{med} i_{grid,\alpha}^{med} - v_{grid,\alpha}^{med} i_{grid,\beta}^{med} \right). \quad (4.54)$$

Cada una de estas señales, junto con la referencia supervisora del maestro P_m^{ref} , Q_m^{ref} usada para construir el residuo en isla, se filtra con el LPF de primer orden de la ecuación (4.22), de constante τ_{pq} en el maestro y $\tau_{pq,s}$ en el esclavo, ambas de 20 ms, lo que atenúa el *ripple* de 100 Hz y las componentes de conmutación que contaminarían el reparto y el balance. Las versiones filtradas llevan el subíndice f , y los puertos del esclavo reciben esas referencias supervisoras filtradas, no mediciones de potencia.

Reparto y saturación de potencia. La coordinación distribuye la solicitud del sistema entre el maestro y los N_{slaves} esclavos. Con γ_m la cuota nominal del maestro, fijada en 0.5 en los archivos de inicialización, la cuota de cada esclavo es

$$\gamma_s = \frac{1 - \gamma_m}{N_{slaves}}. \quad (4.55)$$

Estas fracciones fijan el reparto nominal, pero no limitan la potencia que puede solicitarse, y el modo determina quién cierra el balance. En **modo conectado a la red**, con $G(k) = 1$, los convertidores pueden cubrir una fracción de la carga, igualarla o superarla, y la red externa aporta el déficit o absorbe el excedente. La potencia activa se restringe a valores no negativos porque las unidades se ensayan como fuentes. La potencia aparente se limita mediante

$$S_u^{req} = \sqrt{[\max(P_u^{ref}, 0)]^2 + (Q_u^{ref})^2}, \quad S_{u,\max} = \frac{3}{2} \hat{V}_{nom} I_{\max,u}, \quad (4.56)$$

$$\kappa_u = \min\left(1, \frac{S_{u,\max}}{\max(S_u^{req}, \epsilon)}\right), \quad P_u^{ctrl} = \kappa_u \max(P_u^{ref}, 0), \quad Q_u^{ctrl} = \kappa_u Q_u^{ref}, \quad (4.57)$$

con $u \in \{m, s\}$. El factor común κ_u conserva el ángulo del fasor de potencia. Para los límites de corriente empleados se obtiene $S_{m,\max} = 82.5 \text{ kVA}$ y $S_{s,\max} = 33.0 \text{ kVA}$. La referencia acotada alimenta el control, mientras la solicitud supervisora original se conserva entre las entradas de la PINN. Así, la protección no altera la información usada por el identificador.

En **modo isla**, con $G(k) = 0$, no existe una red externa que cierre el balance. El maestro forma tensión y frecuencia, y los esclavos reciben el residuo entre la carga filtrada y la participación supervisora del maestro,

$$P_s^{ref,eff} = \max\left(\frac{P_{load,f} - P_{m,f}^{ref}}{N_{slaves}}, 0\right), \quad Q_s^{ref,eff} = \frac{Q_{load,f} - Q_{m,f}^{ref}}{N_{slaves}}. \quad (4.58)$$

La potencia activa del esclavo se limita además por $P_s^{ref,eff} \leq I_{\max,s} v_{cota}$, con $v_{cota} = 230 \text{ V}$. Esta cota traduce el límite de corriente a potencia y no reemplaza la referencia nominal de 220 V de valor máximo instantáneo. Al aumentar la participación del maestro disminuye el residuo asignado a los esclavos, mientras el formador entrega la diferencia necesaria para sostener la carga. La reactiva conserva su signo, porque puede entregarse o absorberse dentro de la capacidad de corriente.

Origen físico de las consignas y alcance del recorte. En modo conectado a la red, las referencias del maestro proceden de la capa secundaria de coordinación, que considera el estado del almacenamiento y el despacho comprometido [2,3]. Las referencias de los esclavos pueden originarse en la regulación de sus enlaces de continua y en el seguimiento del punto de máxima potencia, mientras la reactiva responde al factor de potencia o a una característica $Q(v)$ [25]. La saturación se evalúa localmente con magnitudes medidas, de modo que sigue protegiendo al convertidor si la comunicación conserva temporalmente la última consigna recibida. En isla, el reparto residual de la ecuación (4.58) se construye con medidas filtradas del punto de acople común.

El recorte $P^{ref} \geq 0$ es una condición de operación del ensayo, no una limitación física del puente. Una unidad con almacenamiento bidireccional podría absorber potencia si la cota inferior se sustituyera por el límite de carga del banco. Ese cambio no modifica el

predictor ni la función de costo, porque actúa sobre la referencia. La potencia reactiva no se recorta a cero. Su límite efectivo queda dado por la envolvente de potencia aparente y por la restricción de corriente del convertidor.

Corrección de la compensación capacitiva con damping. La compensación ideal de la ecuación (4.36) supone una rama capacitiva con admitancia $Y(j\omega) = j\omega C_f$. En la planta, el *damping* $R_{fc,m}$ en serie altera la admitancia a $Y(j\omega) = j\omega C_f / (1 + j\omega C_f R_{fc,m})$. Definiendo $D_m = 1 + (\omega_{nom} C_f R_{fc,m})^2$,

$$a_{imag,m} = \frac{\omega_{nom} C_f}{D_m}, \quad a_{real,m} = (\omega_{nom} C_f R_{fc,m}) a_{imag,m}, \quad (4.59)$$

la referencia de corriente del lado inversor del maestro, con las consignas ya saturadas en $\mathbf{i}_o^{ref}$, es

$$\mathbf{i}_{f,\alpha}^{ref}(k) = \mathbf{i}_{o,\alpha}^{ref}(k) + a_{real,m} v_{C,\alpha}^{med} - a_{imag,m} v_{C,\beta}^{med}, \quad (4.60)$$

$$\mathbf{i}_{f,\beta}^{ref}(k) = \mathbf{i}_{o,\beta}^{ref}(k) + a_{real,m} v_{C,\beta}^{med} + a_{imag,m} v_{C,\alpha}^{med}. \quad (4.61)$$

Cuando $R_{fc,m} \rightarrow 0$, $a_{real,m} \rightarrow 0$ y $a_{imag,m} \rightarrow \omega_{nom} C_f$, recuperando el caso ideal de la ecuación (4.36). El término $a_{real,m}$ representa la componente activa disipada en la rama capacitiva, omitirlo (con $C_f = 500 \mu\text{F}$, $R_{fc,m} = 0.5 \Omega$) introduce errores de potencia del orden de cientos de watts en el maestro.

Predictor capacitivo del maestro con damping. La corrección anterior actúa sobre la *referencia* de corriente. El *damping* $R_{fc,m}$ interviene además en el *predictor*, y conviene precisar dónde, porque el estado capacitivo y la tensión de la rama completa no son la misma magnitud,

$$\mathbf{v}_c = \mathbf{v}_C + R_{fc,m} \mathbf{i}_{cap}, \quad \mathbf{i}_{cap} = \mathbf{i}_f - \mathbf{i}_o. \quad (4.62)$$

El voltímetro entrega $\mathbf{v}_C$, que es el estado, mientras la caída $R_{fc,m} \mathbf{i}_{cap}$ es algebraica y no un estado adicional. Caben dos realizaciones equivalentes del mismo predictor. Una propaga la *tensión de rama*, y sustituir $\mathbf{v}_C(j) = \mathbf{v}_c(j) - R_{fc,m} \mathbf{i}_{cap}(j)$ en la actualización capacitiva entrega la forma incremental

$$\hat{\mathbf{v}}_c(j+1) = \mathbf{v}_c(j) + b_c \mathbf{i}_{cap}(j) + R_{fc,m} [\mathbf{i}_{cap}(j+1) - \mathbf{i}_{cap}(j)], \quad (4.63)$$

donde el incremento aparece por construcción, porque la parte estática de la caída ya viene contenida en $\mathbf{v}_c(j)$ y escribir $+R_{fc,m} \mathbf{i}_{cap}(j)$ la contaría dos veces. La otra propaga el *estado capacitivo* con la forma directa de la ecuación (4.28) y reconstruye la tensión de rama en cada horizonte donde el predictor de corriente la necesita, según la ecuación (4.26).

Ambas entregan la misma trayectoria y la implementación adopta la segunda por causalidad, porque evaluar la ecuación (4.63) exigiría $\mathbf{i}_{cap}(j+1)$, que en el instante j todavía no existe. Bajo el corrector, b_c se evalúa con C_f^{eff} y $R_{fc,m}$ conserva su valor nominal. Que $R_{fc,m}$ entre multiplicando la corriente de rama dentro de la tensión que ve el inductor, y no el estado capacitivo, condiciona hasta qué punto ese parámetro puede identificarse, como cuantifica la Sección 4.6.2.

Modelo discreto del esclavo. El filtro LCL en $\alpha\beta$ tiene tres estados, $\mathbf{i}_{f,s}$, $\mathbf{v}_{C,s}$, $\mathbf{i}_{o,s}$, y la rama capacitiva lleva su propia resistencia de amortiguamiento $R_{fc,s}$,

$$\begin{aligned}\frac{d\mathbf{i}_{f,s}}{dt} &= \frac{1}{L_{f,s}} (\mathbf{u}_s - R_{f,s}\mathbf{i}_{f,s} - \mathbf{v}_{C,s} - R_{fc,s}(\mathbf{i}_{f,s} - \mathbf{i}_{o,s})), \\ \frac{d\mathbf{v}_{C,s}}{dt} &= \frac{1}{C_{f,s}} (\mathbf{i}_{f,s} - \mathbf{i}_{o,s}), \\ \frac{d\mathbf{i}_{o,s}}{dt} &= \frac{1}{L_{out,s}} (\mathbf{v}_{C,s} + R_{fc,s}(\mathbf{i}_{f,s} - \mathbf{i}_{o,s}) - R_{out,s}\mathbf{i}_{o,s} - \mathbf{v}_{PCC}).\end{aligned}\quad (4.64)$$

El esclavo repite aquí la estructura del maestro que fija la ecuación (4.62). El estado es la tensión del condensador $\mathbf{v}_{C,s}$, que es lo que mide el voltímetro, y la tensión de la rama completa $\mathbf{v}_{c,s} = \mathbf{v}_{C,s} + R_{fc,s}(\mathbf{i}_{f,s} - \mathbf{i}_{o,s})$ se reconstruye allí donde la física la exige, con signo negativo en el balance del inductor del lado inversor y con signo positivo en el del inductor de salida, porque es esa tensión y no la del condensador la que aparece en los dos extremos de la rama. La actualización capacitiva no lo lleva. El amortiguamiento entra además en la referencia $\mathbf{i}_{f,s}^{ref}$ mediante la admitancia de la rama $C_{f,s}-R_{fc,s}$, como en el maestro. La discretización por Euler hacia adelante define

$$a_{i,s} = 1 - \frac{R_{f,s}T_s}{L_{f,s}}, \quad b_{i,s} = \frac{T_s}{L_{f,s}}, \quad b_{c,s} = \frac{T_s}{C_{f,s}}, \quad a_{o,s} = 1 - \frac{R_{out,s}T_s}{L_{out,s}}, \quad b_{o,s} = \frac{T_s}{L_{out,s}}. \quad (4.65)$$

Sincronización del esclavo. Cada esclavo replica el SOGI-PSD de las ecuaciones (4.15)–(4.17) y el SRF-PLL de las ecuaciones (4.18)–(4.20) sobre $\mathbf{v}_{PCC}^{med}$, añadiendo el subíndice s y usando su ángulo de sincronización $\theta_{sync,s}$. La entrada efectiva es $\mathbf{v}_{PLL,s} = \mathbf{v}_{PCC,s}^+$ con su detector habilitado y $\mathbf{v}_{PCC}^{med}$ en caso contrario, que es el caso base. A diferencia del maestro, el PLL del esclavo se mantiene activo en ambos modos, en isla, el PCC lo impone el maestro *grid-forming* y los esclavos deben seguir su tensión y cualquier desplazamiento angular.

Predicción común del esclavo. Con los estados de conmutación previos ($S_{a,s}, S_{b,s}, S_{c,s}$) que definen $\mathbf{u}_{prev,s}(k)$ mediante la ecuación (4.25), con bus $V_{dc,s}^{med}$, las predicciones comunes a todos los candidatos son, en α y β . Corriente del lado inversor,

$$\hat{\mathbf{i}}_{f,s,\alpha}(k+1) = a_{i,s} \mathbf{i}_{f,s,\alpha}^{med}(k) + b_{i,s} \left(u_{prev,s,\alpha}(k) - v_{C,s,\alpha}^{med}(k) - R_{fc,s} \delta_{s,\alpha}(k) \right), \quad (4.66)$$

$$\hat{\mathbf{i}}_{f,s,\beta}(k+1) = a_{i,s} \mathbf{i}_{f,s,\beta}^{med}(k) + b_{i,s} \left(u_{prev,s,\beta}(k) - v_{C,s,\beta}^{med}(k) - R_{fc,s} \delta_{s,\beta}(k) \right), \quad (4.67)$$

con $\delta_{s,\xi}(k) = \mathbf{i}_{f,s,\xi}^{med}(k) - \mathbf{i}_{o,s,\xi}^{med}(k)$ la corriente de la rama capacitiva. Tensión del capacitor central,

$$\hat{v}_{C,s,\alpha}(k+1) = v_{C,s,\alpha}^{med}(k) + b_{c,s} \delta_{s,\alpha}(k), \quad (4.68)$$

$$\hat{v}_{C,s,\beta}(k+1) = v_{C,s,\beta}^{med}(k) + b_{c,s} \delta_{s,\beta}(k), \quad (4.69)$$

corriente de salida, donde la tensión que impulsa el inductor del lado del PCC es la de la rama completa y por eso el término resistivo entra sumando,

$$\hat{\mathbf{i}}_{o,s,\alpha}(k+1) = a_{o,s} \mathbf{i}_{o,s,\alpha}^{med}(k) + b_{o,s} \left(v_{C,s,\alpha}^{med}(k) + R_{fc,s} \delta_{s,\alpha}(k) - v_{PCC,\alpha}^{med}(k) \right), \quad (4.70)$$

$$\hat{\mathbf{i}}_{o,s,\beta}(k+1) = a_{o,s} \mathbf{i}_{o,s,\beta}^{med}(k) + b_{o,s} \left(v_{C,s,\beta}^{med}(k) + R_{fc,s} \delta_{s,\beta}(k) - v_{PCC,\beta}^{med}(k) \right). \quad (4.71)$$

La tensión del PCC se extrapola a $k+n$, $n \in \{1, 2\}$, según la ecuación (4.11).

Cadena de referencias del esclavo. Con $P_s^{ref,eff}$ y $Q_s^{ref,eff}$ del reparto, la corriente de salida de referencia se obtiene de la teoría de potencia instantánea usando $v_{PLL,s}$ como fasor,

$$i_{o,s,\alpha}^{ref} = \frac{2}{3} \frac{v_{PLL,s,\alpha} P_s^{ref,eff} + v_{PLL,s,\beta} Q_s^{ref,eff}}{v_{PLL,s,\alpha}^2 + v_{PLL,s,\beta}^2}, \quad (4.72)$$

$$i_{o,s,\beta}^{ref} = \frac{2}{3} \frac{v_{PLL,s,\beta} P_s^{ref,eff} - v_{PLL,s,\alpha} Q_s^{ref,eff}}{v_{PLL,s,\alpha}^2 + v_{PLL,s,\beta}^2}. \quad (4.73)$$

La referencia del lado inversor incorpora el *damping* de la rama $C_{f,s}$ - $R_{fc,s}$. Con $D_s = 1 + (\omega_{nom} C_{f,s} R_{fc,s})^2$, $a_{imag,s} = \omega_{nom} C_{f,s} / D_s$ y $a_{real,s} = (\omega_{nom} C_{f,s} R_{fc,s}) a_{imag,s}$,

$$i_{f,s,\alpha}^{ref} = i_{o,s,\alpha}^{ref} + a_{real,s} v_{PLL,s,\alpha} - a_{imag,s} v_{PLL,s,\beta}, \quad (4.74)$$

$$i_{f,s,\beta}^{ref} = i_{o,s,\beta}^{ref} + a_{real,s} v_{PLL,s,\beta} + a_{imag,s} v_{PLL,s,\alpha}. \quad (4.75)$$

Sin el término $a_{real,s}$ el efecto resistivo del damping queda fuera de la referencia y aparece una desviación de potencia que no es un problema de seguimiento del FCS-MPC, sino una inconsistencia entre planta y referencia. La tensión de referencia del condensador se calcula solo para monitoreo,

$$v_{C,s,\alpha}^{ref} = v_{PLL,s,\alpha} + R_{out,s} i_{o,s,\alpha}^{ref} - \omega_{nom} L_{out,s} i_{o,s,\beta}^{ref}, \quad (4.76)$$

$$v_{C,s,\beta}^{ref} = v_{PLL,s,\beta} + R_{out,s} i_{o,s,\beta}^{ref} + \omega_{nom} L_{out,s} i_{o,s,\alpha}^{ref}. \quad (4.77)$$

Finalmente, la referencia de corriente del lado inversor se extrapola a $k+2$ por rotación sinusoidal,

$$i_{f,s,\alpha}^{ref}(k+2) = i_{f,s,\alpha}^{ref}(k) \cos(2\omega_{nom} T_s) - i_{f,s,\beta}^{ref}(k) \sin(2\omega_{nom} T_s), \quad (4.78)$$

$$i_{f,s,\beta}^{ref}(k+2) = i_{f,s,\beta}^{ref}(k) \sin(2\omega_{nom} T_s) + i_{f,s,\alpha}^{ref}(k) \cos(2\omega_{nom} T_s). \quad (4.79)$$

Predicción por candidato y costo del esclavo. Para cada $r \in \{0, \dots, 7\}$ con vector $\mathbf{u}_{s,r}$,

$$\hat{i}_{f,s,r,\alpha}(k+2) = a_{i,s} \hat{i}_{f,s,\alpha}(k+1) + b_{i,s} \left(u_{s,r,\alpha}(k+1) - \hat{v}_{C,s,\alpha}(k+1) - R_{fc,s} \hat{\delta}_{s,\alpha}(k+1) \right), \quad (4.80)$$

$$\hat{i}_{f,s,r,\beta}(k+2) = a_{i,s} \hat{i}_{f,s,\beta}(k+1) + b_{i,s} \left(u_{s,r,\beta}(k+1) - \hat{v}_{C,s,\beta}(k+1) - R_{fc,s} \hat{\delta}_{s,\beta}(k+1) \right), \quad (4.81)$$

con $\hat{\delta}_{s,\xi}(k+1) = \hat{i}_{f,s,\xi}(k+1) - \hat{i}_{o,s,\xi}(k+1)$, de modo que la tensión de rama se reconstruye también en el segundo horizonte. El costo del esclavo penaliza únicamente el seguimiento de corriente y el límite,

$$g_s(r) = \lambda_{i,s} \left[\left(i_{f,s,\alpha}^{ref}(k+2) - \hat{i}_{f,s,r,\alpha}(k+2) \right)^2 + \left(i_{f,s,\beta}^{ref}(k+2) - \hat{i}_{f,s,r,\beta}(k+2) \right)^2 \right] + g_{ilim,s}(r), \quad (4.82)$$

con $g_{ilim,s}$ análogo al de la ecuación (4.48) (límite $I_{max,s}$), y $r_s^{ref} = \arg \min_r g_s(r)$. La ausencia de término de tensión responde al objetivo del esclavo, que es seguir $i_{f,s}$ para cumplir la potencia asignada, mientras $v_{C,s}$ es interna del LCL y no variable primaria de control. Al igual que en el maestro, las salidas relevantes para monitoreo son $i_{o,s}^{ref}$, $i_{f,s}^{ref}(k+2)$ y $v_{c,s}^{ref}$, junto con las magnitudes efectivamente construidas por el convertidor.

Balance de potencia y consistencia angular. En régimen estacionario el balance activo y reactivo en el nodo del PCC cierra por la ley de corrientes de Kirchhoff,

$$P_{load} = P_{PCC} + P_{o,1} + P_{o,2} + P_{grid}, \quad Q_{load} = Q_{PCC} + Q_{o,1} + Q_{o,2} + Q_{grid}, \quad (4.83)$$

donde P_{PCC} es el aporte del maestro y $P_{grid} \equiv 0$ en isla. La consistencia angular se verifica comparando θ_m , θ_{vPCC} , $\theta_{sync,1}$ y $\theta_{sync,2}$. Estas variables deben evolucionar a la misma frecuencia media sin desfase relativo creciente. Los desfases constantes representan el intercambio de potencia y el acoplamiento por las impedancias de línea.

Comprobación del balance. El cierre numérico de la ecuación (4.83) se evalúa en el caso nominal para ambos modos con ventanas estacionarias comunes. Puesto que esta comprobación es evidencia obtenida de las simulaciones y no una decisión de diseño, sus valores se presentan en la Tabla 5.1 del Capítulo 5.

4.4.9. Síntesis de la implementación del Escenario 1

Las secciones anteriores han recorrido el Escenario 1 por partes, desde la topología hasta el reparto de potencia, y cada una ha añadido sus ecuaciones. Conviene cerrar la sección con una vista de conjunto que muestre cómo se encadenan esas piezas dentro de un periodo de control, porque el orden en que se ejecutan no siempre coincide con el orden en que se han presentado. La Figura 4.3 lo recoge.

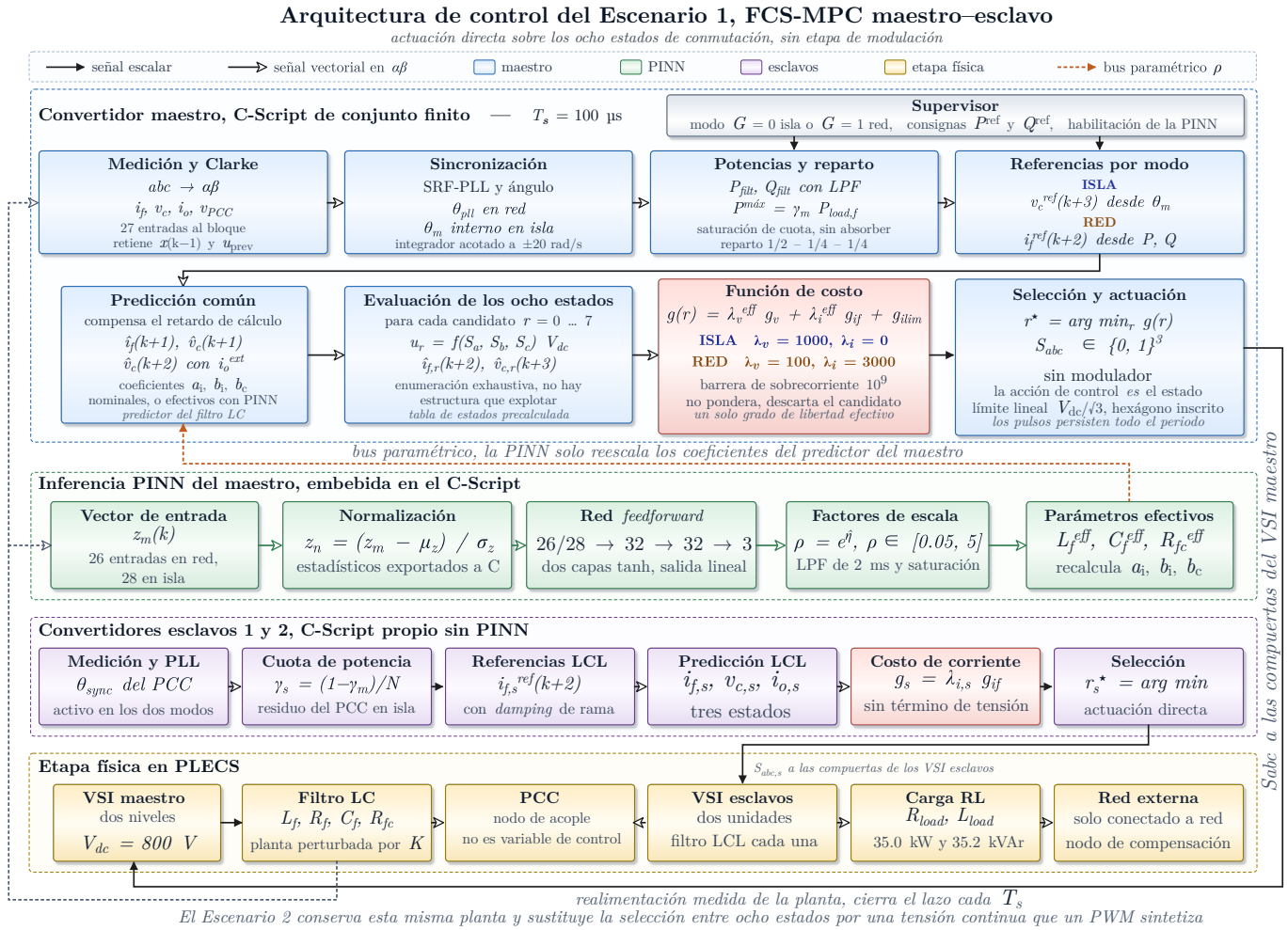


Figura 4.3. Arquitectura de control del Escenario 1.

La figura se organiza en cuatro filas, el C-Script del maestro, la inferencia de la PINN embebida en ese mismo bloque, los C-Script de los dos esclavos y la etapa física simulada en PLECS. La cadena del maestro ordena la ejecución de un periodo en dos filas. La primera prepara la información, con la transformación de Clarke, la memoria de un paso, el ángulo del SRF-PLL, el filtrado de potencias y el reparto, y termina construyendo las referencias, que es donde el modo bifurca, una referencia de tensión sintetizada desde el ángulo interno en isla y una de corriente desde las consignas saturadas en modo conectado a la red. La segunda fila propaga la dinámica del filtro LC hasta $k+1$ y $k+2$ para compensar el retardo de cálculo, evalúa los ocho estados admisibles con su predicción a $k+2$ y $k+3$, y aplica el ganador a las compuertas sin etapa intermedia. El bus paramétrico en trazo discontinuo marca el alcance de la PINN, cuyas salidas no llegan a las referencias, ni a los pesos del costo, ni a la selección del estado, sino únicamente a los coeficientes a_i, b_i y b_c del predictor.

Por qué el horizonte llega a $k+3$. La cadena temporal de la figura conviene leerla de forma explícita, porque de ella nace la única asimetría del costo. En el instante k se mide el estado, mientras la acción $\mathbf{u}(k)$ ya está aplicada porque se decidió en el periodo anterior. La primera propagación, a $k+1$, ecuaciones (4.26) y (4.28), no elige nada y solo

traslada el estado medido al instante en que la decisión nueva empezará a actuar, que es la compensación del retardo de cálculo. Sobre ese estado se evalúan los ocho vectores admisibles, cada uno propagado a $k+2$, ecuación (4.41), y ahí termina la predicción de corriente. El término g_{if} del costo, ecuación (4.47), compara exactamente ese $\hat{i}_f(k+2)$ contra su referencia.

La tensión necesita un paso más, y la razón es física antes que numérica. El condensador integra la corriente de rama, de modo que la corriente que un candidato impone en $k+2$ no se manifiesta como tensión hasta $k+3$, ecuación (4.43). Evaluar el error de tensión en $k+2$ compararía un estado sobre el que el candidato todavía no ha actuado, y los ocho vectores entregarían el mismo valor, con lo que el término g_v dejaría de discriminar. El horizonte del canal de tensión es por tanto $k+3$ y el del canal de corriente $k+2$, y esa diferencia de un periodo no es una elección de sintonía sino la consecuencia directa de que uno de los dos estados es la integral del otro.

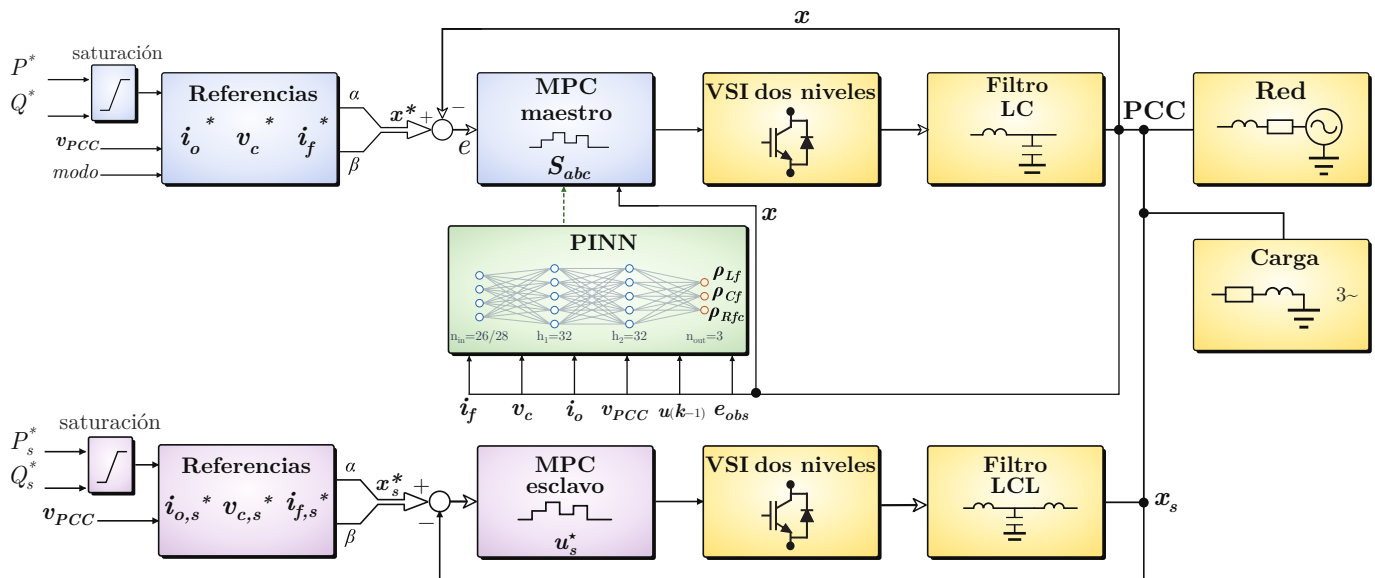


Figura 4.4. Diagrama de bloques del Escenario 1.

La Figura 4.4 responde a una pregunta distinta, cuál es la estructura de control que subyace a esa ejecución. Las consignas P^{ref} y Q^{ref} pasan por el saturador y entran, junto con v_{PCC} y el modo, al bloque de referencias, cuyo punto de partida depende del modo, la tensión de condensador deseada en isla, ecuación (4.32), y la corriente de salida deseada en modo conectado a la red, ecuación (4.34). Las dos rutas terminan en i_f^{ref} , ecuación (4.37), que es la única que entra a la función de costo, ecuación (4.45). El vector x que cierra las realimentaciones reúne i_f , v_c , i_o y v_{PCC} con sus dos componentes, más la actuación del paso anterior, y con ellas el predictor propaga hasta $k+1$ y $k+2$, ecuaciones (4.26) y (4.30). De ahí una consecuencia que conviene retener, el error que la función de costo evalúa no es la diferencia entre la referencia y el estado medido sino entre la referencia y el estado *predicho*. Las seis flechas rotuladas del bus que alimenta a la PINN son seis grupos y no seis escalares, porque el vector de entrada completo, ecuación (4.122), tiene 26 componentes en modo conectado a la red y 28 en isla. La fila inferior repite la estructura sobre el filtro LCL con la referencia $i_{f,s}^{ref}$ del reparto de la ecuación (4.55). Sobre el acople entre unidades conviene ser preciso, porque ninguna acción de control viaja de una unidad

a otra, pero los dos controladores leen el mismo punto de acople y en isla el esclavo recibe la cuota que cubre el residuo de carga que el maestro no aporta. El acople existe en el nivel de las referencias y no en el de la actuación, y es esa separación la que permite sostener el reparto sin un enlace de comunicación dedicado entre convertidores.

4.5. Escenario 2, control por modulación, amortiguamiento activo y seguimiento de la corriente de salida

El Escenario 1 dejó una microrred maestro–esclavo trazable, pero conserva la limitación estructural anticipada en la Sección 4.4, la actuación directa sobre los estados de conmutación, que dispersa el *ripple* en una banda en torno a $1/T_s$ y deja la corriente de salida alejada de su referencia en modo conectado a la red. El Escenario 2 introduce, sobre la misma planta y las mismas consignas, una cadena incremental de mejoras. Primero sustituye la actuación directa por un MPC modulado que entrega una tensión de referencia continua a un PWM de frecuencia fija, estrategia conocida como control predictivo modulado [40] y clasificada como MPC de conjunto de control continuo [41]. Sobre esa tensión añade una resistencia virtual para amortiguar la resonancia y un filtrado *washout* para que el amortiguamiento no degrade la fundamental. En isla incorpora un lazo proporcional de tensión y, sobre su eje directo, un integrador que elimina el error de régimen, y en conexión a la red un integrador en marco sincrónico sobre la corriente de salida. Las subsecciones siguientes formulan cada bloque en el orden en que se incorporó, y la Sección 4.5.6 recoge el caso base resultante.

4.5.1. Del conjunto finito al MPC modulado

La primera mejora sustituye el conjunto de control finito por uno continuo y delega la síntesis de la tensión en un modulador PWM simétrico de portadora fija. El cambio no es de algoritmo sino de *conjunto admisible*, y esa distinción organiza el resto de la sección. En la taxonomía de [6] los dos escenarios son un MPC de conjunto finito y uno de conjunto continuo, y en la de [41] un MPC directo y uno indirecto. Ambas coinciden en lo que aquí importa, el modulador no es un accesorio opcional sino una consecuencia del conjunto admisible, porque la salida del optimizador es una tensión de valor real que algún dispositivo debe sintetizar conmutando [42]. La conmutación pasa a ser periódica y el *ripple* se concentra en la portadora, conservando el predictor y la corrección de parámetros. La portadora f_c y el periodo T_s se fijan por el criterio de comparación que se detalla más abajo, y sus valores están en la Tabla 4.6.

Subproblema predictivo de corriente y solución cerrada. Para aislar el núcleo rápido de corriente, ambos escenarios pueden formular el mismo criterio de seguimiento sobre el horizonte de compensación del retardo,

$$\mathbf{u}_{\alpha\beta}^*(k+2) = \arg \min_{\mathbf{u} \in \mathcal{U}} g(\mathbf{u}), \quad g(\mathbf{u}) = \left\| \mathbf{i}_f^{ref}(k+2) - \hat{\mathbf{i}}_f(k+2 | \mathbf{u}) \right\|_2^2, \quad (4.84)$$

donde la diferencia inmediata es el conjunto admisible $\mathcal{U}$. En el Escenario 1 ese conjunto es finito, $\mathcal{U}_{FCS} = \{\mathbf{v}_0, \dots, \mathbf{v}_7\}$, los ocho vectores de tensión que el inversor de dos niveles puede aplicar según la Sección 4.3.3, y el mínimo se obtiene por enumeración porque sobre

un conjunto discreto no hay estructura que explotar. En el Escenario 2 el conjunto se relaja a la región lineal del modulador senoidal,

$$\mathcal{U}_{\text{CCS}} = \{\mathbf{u} \in \mathbb{R}^2 : \|\mathbf{u}\|_2 \leq V_{dc}/2\}, \quad (4.85)$$

que es convexo y compacto.

Sobre ese conjunto el problema deja de requerir enumeración. El punto de partida es el predictor de corriente del inductor definido en la Sección 4.4, que en coordenadas $\alpha\beta$ y evaluado en el horizonte $k+2$ se escribe

$$\hat{\mathbf{i}}_f(k+2|\mathbf{u}) = a_i \hat{\mathbf{i}}_f(k+1) + b_i \left[\mathbf{u} - \hat{\mathbf{v}}_C(k+1) - R_{fc,m} \left(\hat{\mathbf{i}}_f(k+1) - \mathbf{i}_o^{ext}(k+1) \right) \right]. \quad (4.86)$$

La barra vertical de $\hat{\mathbf{i}}_f(k+2|\mathbf{u})$ indica dependencia funcional y no condicionamiento probabilístico, es decir la corriente que el predictor entrega en $k+2$ si durante ese intervalo se aplicase $\mathbf{u}$, con el resto del estado en los valores ya predichos. Ni esos valores ni la caída en $R_{fc,m}$ dependen de la decisión, de modo que el predictor es afín en la acción.

Sustituyendo la ecuación (4.86) en la (4.84), el costo queda cuadrático en $\mathbf{u}$. La tensión entra en el predictor multiplicada por b_i , de modo que el residuo $\mathbf{r} = \mathbf{i}_f^{ref}(k+2) - \hat{\mathbf{i}}_f(k+2|\mathbf{u})$ tiene jacobiano $\partial \mathbf{r} / \partial \mathbf{u} = -b_i \mathbf{I}_2$. Derivando dos veces $g = \|\mathbf{r}\|_2^2$ resulta la hessiana

$$\nabla^2 g = 2b_i^2 \mathbf{I}_2 \succ 0, \quad (4.87)$$

estrictamente definida positiva mientras $b_i = T_s / L_f^{eff} \neq 0$, lo que ocurre siempre porque el factor de escala está acotado por debajo. Por el criterio de segundo orden, una hessiana definida positiva en todo el dominio implica convexidad estricta [43], de modo que el problema admite un mínimo único. Anulando el gradiente,

$$\nabla g = -2b_i \left[\mathbf{i}_f^{ref}(k+2) - \hat{\mathbf{i}}_f(k+2|\mathbf{u}) \right] = \mathbf{0}, \quad (4.88)$$

se obtiene la condición de residuo nulo $\hat{\mathbf{i}}_f(k+2) = \mathbf{i}_f^{ref}(k+2)$, y despejar $\mathbf{u}$ de ella entrega la tensión de referencia *deadbeat*

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_{\alpha\beta}^*(k+2) &= \frac{\mathbf{i}_f^{ref}(k+2) - a_i \hat{\mathbf{i}}_f(k+1)}{b_i} + \hat{\mathbf{v}}_C(k+1) \\ &\quad + R_{fc,m} \left(\hat{\mathbf{i}}_f(k+1) - \mathbf{i}_o^{ext}(k+1) \right). \end{aligned} \quad (4.89)$$

donde $\hat{\mathbf{i}}_f(k+1)$, $\hat{\mathbf{v}}_C(k+1)$ y $\mathbf{i}_o^{ext}(k+1)$ ya están disponibles cuando se resuelve el control. El término resistivo completa la tensión de la rama conforme a la ecuación (4.7). Sobre la notación, $\mathbf{u}_{\alpha\beta}^*(k+2)$ designa la *tensión calculada en el instante k para el horizonte $k+2$* , no una tensión que se calcule recién en $k+2$.

Validez del desarrollo. El recorrido de la ecuación (4.84) a la (4.89) es la construcción habitual del control predictivo de conjunto continuo, donde relajar el conjunto admisible a una región convexa sustituye la enumeración por un problema cuadrático con solución cerrada [40, 41]. Sus tres condiciones se cumplen aquí por construcción, costo cuadrático en $\mathbf{u}$, hessiana definida positiva y conjunto convexo y cerrado, de modo que anular el gradiente es suficiente y la ecuación (4.89) entrega el mínimo global [43]. Que coincida

con la ley *deadbeat* clásica no es casual, porque el costo penaliza únicamente el error de seguimiento a un paso. **La equivalencia no se extiende al control completo**, ya que el Escenario 2 añade lazos externos que construyen la referencia antes de este costo y opera con otro periodo de actualización. El horizonte $k + 2$ compensa un periodo de retardo digital [44], y los coeficientes a_i y b_i conservan el reescalado paramétrico, de manera que el MPC modulado mantiene la corrección de la PINN. El Apéndice A.10 desarrolla las tres condiciones y la deducción completa.

La tensión $\mathbf{u}_{\alpha\beta}^*$ se transforma a coordenadas de fase por la antitransformada de Clarke de la Sección 4.3.2 y se normaliza por la mitad del bus de continua para obtener los índices de modulación que alimentan el comparador del modulador

$$m_x = \frac{2 u_x^{ref}}{V_{dc}}, \quad m_x \in [-1, 1], \quad x \in \{a, b, c\}, \quad (4.90)$$

Antes de la normalización se limita la magnitud de $\mathbf{u}_{\alpha\beta}^*$ al radio de la región lineal del modulador senoidal, $|\mathbf{u}^*| \leq V_{dc}/2$, preservando la fase de la tensión solicitada. La tensión que realimenta al predictor se reconstruye desde los índices ya recortados y representa el valor promedio ordenado al modulador durante el intervalo de control.

Ese recorte no es una heurística sino la solución exacta del problema con restricción de actuación. Como la hessiana es un múltiplo positivo de la identidad, las curvas de nivel del costo son circunferencias concéntricas alrededor de $\mathbf{u}_{\alpha\beta}^*$ y minimizar sobre el conjunto equivale a proyectar sobre él, proyección que para una bola euclidiana admite forma cerrada [43]. Con el operador $\text{proj}_{\mathcal{C}}(\cdot)$ que fija la Tabla 4.2,

$$\mathbf{u}_{\alpha\beta, \text{apl}}^* = \text{proj}_{\mathcal{U}_{\text{CS}}}(\mathbf{u}_{\alpha\beta}^*) = \mathbf{u}_{\alpha\beta}^* \cdot \min \left\{ 1, \frac{V_{dc}/2}{\|\mathbf{u}_{\alpha\beta}^*\|_2} \right\}, \quad (4.91)$$

que es exactamente limitar la magnitud conservando la fase. El esquema entrega por lo tanto el óptimo del problema restringido y no una aproximación suya, propiedad que el conjunto finito no puede reclamar porque su restricción de actuación ya está incorporada en la enumeración.

Un selector lógico conmuta entre la rama modulada y una rama de conjunto finito dentro del mismo modelo. Desactivarlo permite comprobar la compatibilidad funcional del núcleo FCS, pero no reproduce por sí solo el Escenario 1 completo. Se conservan la temporización, el cableado y los lazos propios del modelo que aloja el selector, por lo que la comparación final se realiza entre las dos simulaciones dedicadas.

En PLECS, el bloque *Symmetrical PWM* es externo al **C-Script**. Este compara los índices m_{abc} con una portadora triangular y entrega los pulsos $S_{abc} \in \{0, 1\}$ al inversor, de manera análoga a un periférico de modulación separado del procesador de control. Su modo de muestreo determina cuántas veces por periodo de portadora se toma el índice m , una vez en *regular single-update* y dos veces, en el mínimo y en el máximo de la triangular, en *regular double-update*. Se adopta el modo *double-update*, con lo que el periodo de control queda ligado a la portadora por

$$T_s = \frac{1}{2f_c}. \quad (4.92)$$

El factor dos proviene de las dos actualizaciones por ciclo triangular y permite reducir la portadora conservando dos decisiones de control por periodo. Así se mantiene la corres-

pondencia temporal del predictor *deadbeat*. En la rama de compatibilidad FCS del modelo modulado, el índice $m_x = 2S_x - 1$ toma solo los valores ± 1 , que saturan el comparador y reproducen el estado binario. Esta comprobación pertenece a ese modelo y no sustituye la campaña del Escenario 1, cuya actuación llega directamente al puente y cuya actualización permanece en 10 kHz.

Índice solicitado e índice aplicado. La ecuación (4.90) y la proyección de la ecuación (4.91) obligan a distinguir dos magnitudes que comparten nombre y no valor. El *índice solicitado* es el cociente entre la tensión que el *deadbeat* pide y la mitad de la tensión de bus, antes de cualquier recorte, y puede superar la unidad. El *índice aplicado* resulta de la proyección y de la saturación por fase, nunca la supera y es el que el modulador compara con la portadora, de modo que el promedio de los pulsos en un periodo reproduce su valor. Cuando el solicitado excede la unidad el convertidor no entra en sobremodulación, porque la proyección lo impide, sino que entrega una tensión de módulo menor que el pedido y de fase correcta. **El sistema no distorsiona la onda, queda con un déficit de amplitud**, de modo que ninguna condición de las campañas opera en sobremodulación ni presenta armónicos de bajo orden atribuibles a ese fenómeno.

Tres decisiones de alcance acompañan a esta formulación. No se inyecta secuencia cero, con lo que la relación entre índice y tensión es lineal, el límite por fase queda en $V_{dc}/2$, en condición nominal el índice solicitado vale 0.61 y el Capítulo 5 cuantifica cuánta de la desventaja del esquema modulado procede de ahí. El conjunto se relaja *antes* de optimizar, a diferencia del M2PC [40] y del M3PC [26], que parten del conjunto finito y reparten el periodo entre dos o tres vectores, de manera que ambas rutas llegan a frecuencia fija por caminos distintos. Y la portadora se fija por medición, porque la actividad de conmutación del conjunto finito es variable y menor que su frecuencia de muestreo, de modo que igualar T_s no equipara el esfuerzo. Se detalla a continuación.

Frecuencia de conmutación y comparación justa. **Igualar T_s no equipara el esfuerzo de conmutación de los dos escenarios**, porque la actividad del conjunto finito es variable y menor que su frecuencia de muestreo. La comparación se hace por tanto a *igual frecuencia de conmutación real*, de la que dependen la calidad de forma de onda y las pérdidas. Evaluada la ecuación (4.12) sobre un registro de alta resolución del caso nominal resulta $f_{sw,eff} \approx 2.33$ kHz, de modo que la portadora se fija en $f_c = 2330$ Hz y el periodo en $T_s = 1/(2f_c) \approx 214.6$ μs por la ecuación (4.92). Al cambiar T_s respecto de los 100 μs del caso base, la sintonía de los lazos que dependen de él se recalcula según las subsecciones siguientes, y la Tabla 4.6 la resume.

El mismo esquema se aplica al esclavo sobre su filtro LCL, usando su propio predictor de la corriente del inductor del lado inversor. El esclavo es seguidor de red y no requiere lazo de tensión, de modo que su referencia i_f^{ref} es la construida en la Sección 4.4 con la prealimentación capacitiva. Esta etapa sustituye además la frecuencia de conmutación variable por una portadora fija, compatible con moduladores estándar.

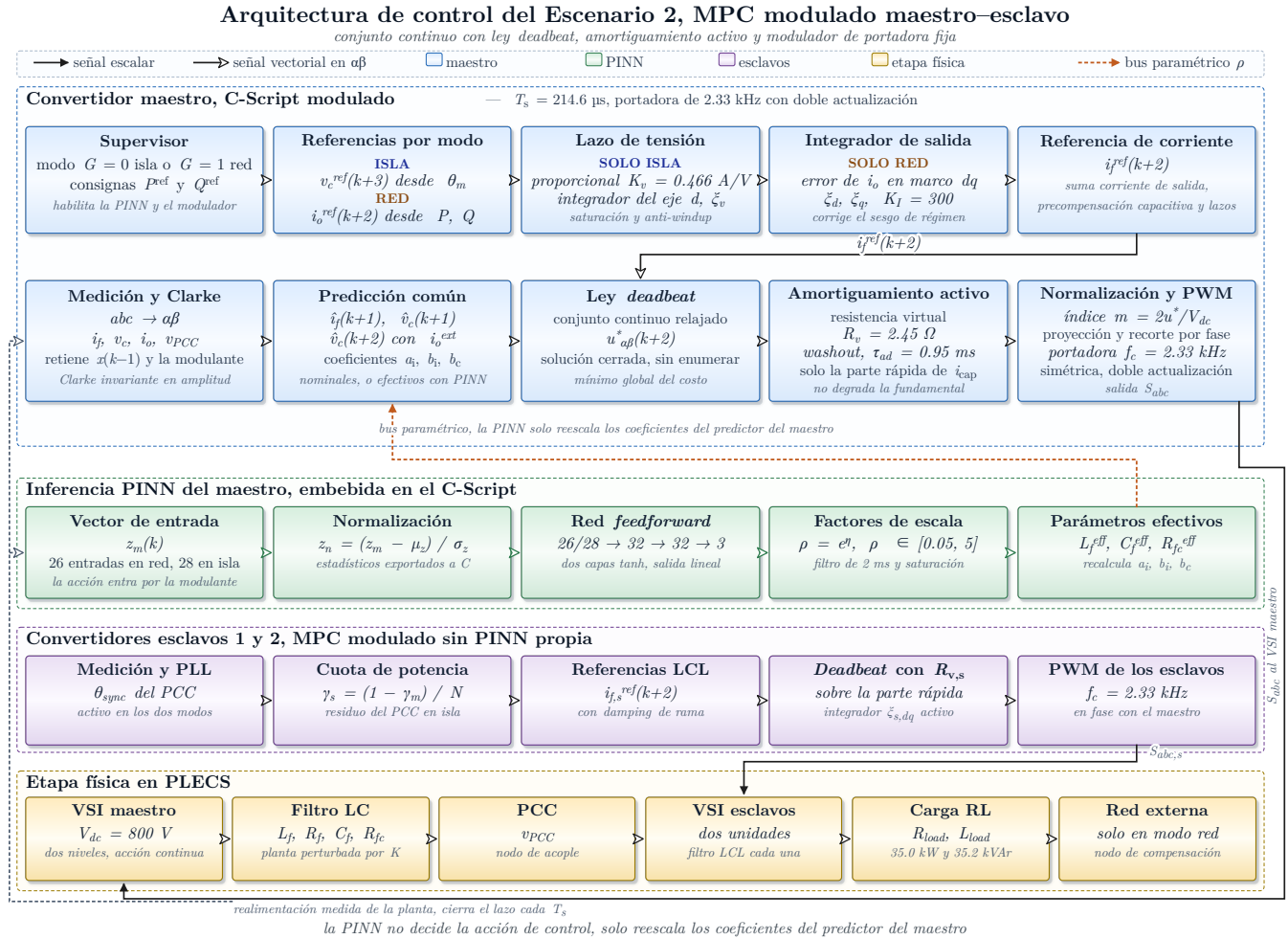


Figura 4.5. Arquitectura de control del Escenario 2.

La Figura 4.5 sitúa las operaciones de los C-Scripts frente a los bloques físicos de PLECS, en cuatro carriles, el control del maestro, la inferencia de la PINN, el control de los esclavos y la etapa simulada. Se lee de izquierda a derecha en cada fila, y las cajas recogen la operación que ejecuta cada etapa, no su desarrollo, que es el de las subsecciones anteriores. Lo que conviene retener es el orden de la cadena del maestro. La fila superior construye la referencia de corriente a partir del modo y de los dos lazos externos, y la inferior prepara el modelo, resuelve la ley *deadbeat*, aplica el amortiguamiento y solo entonces entrega el índice al modulador. Las etiquetas de modo sobre las cajas declaran qué lazo está activo en cada régimen, el de tensión únicamente en isla y el integrador en marco sincrónico únicamente en modo conectado a la red, mientras el amortiguamiento activo opera siempre. **La PINN no determina la acción de control, solo reescala los coeficientes del predictor.** Los esclavos reproducen la misma cadena modulada sobre su filtro LCL, sin lazo de tensión por ser seguidores y sin PINN propia. El diagrama de bloques de la Figura 4.6 recoge esta misma arquitectura en la forma sintética de un lazo de control, y las dos se complementan.

4.5.2. Amortiguamiento activo por resistencia virtual

Los dos bloques que siguen atienden problemas encadenados y distintos. La tensión *deadbeat* de la ecuación (4.89) invierte el modelo del inductor en un solo paso, con lo que su contenido espectral no está acotado y excita la resonancia del filtro cada vez que la referencia se mueve. Al desaparecer la conmutación dispersa del conjunto finito esa excitación deja de repartirse en frecuencia y se concentra donde el filtro amplifica. La resistencia virtual amortigua esa resonancia, no el *ripple* de conmutación, y el filtro *washout* de la Sección 4.5.3 atiende después su efecto colateral, la degradación de la fundamental.

El filtro LC del maestro tiene una frecuencia natural $f_{\text{res}} = 1/(2\pi\sqrt{L_f C_f}) \approx 130$ Hz y el par LC reducido del esclavo tiene una de 160 Hz (ecuación (4.2)). Estas escalas dimensionan el amortiguamiento local, mientras la planta y la predicción de salida conservan el LCL y su línea, cuya frecuencia natural con PCC rígido es 640 Hz. Para amortiguarlas sin disipación se realimenta la corriente del condensador [25], una de las estrategias comparadas en la literatura para convertidores conectados a red, donde se documenta su sensibilidad al retardo digital y a la desintonía del filtro [45].

$$\mathbf{i}_{\text{cap}}(k) = \mathbf{i}_f(k) - \mathbf{i}_o(k), \quad (4.93)$$

y se descuenta de la tensión de referencia una caída proporcional a esa corriente

$$\mathbf{u}_{\alpha\beta}^{*'}(k) = \mathbf{u}_{\alpha\beta}^*(k) - R_v \mathbf{i}_{\text{cap}}(k). \quad (4.94)$$

La realimentación introduce una impedancia virtual, no un disipador físico. Para dimensionarla se compara un LC auxiliar con amortiguamiento plano con la forma canónica. Se omiten rama de salida, resistencia capacitiva, *washout* y retardos (Apéndice A.7.3), y resulta

$$R_v = 2\zeta\sqrt{\frac{L_f}{C_f}} - R_f = 2\zeta Z_0 - R_f, \quad Z_0 = \sqrt{\frac{L_f}{C_f}}. \quad (4.95)$$

Descontando R_f , para el maestro $Z_{0,m} = \sqrt{3\text{mH}/500\text{ }\mu\text{F}} = 2.449\text{ }\Omega$ y $\zeta = 0.5$ dan $R_{v,m} = 2.437\text{ }\Omega$, y se implementan $2.45\text{ }\Omega$. Para el esclavo, $Z_{0,s} = \sqrt{3.3\text{mH}/300\text{ }\mu\text{F}} = 3.317\text{ }\Omega$ da $R_{v,s} = 3.305\text{ }\Omega$, redondeado a $3.3\text{ }\Omega$. La reducción trata i_o como entrada, no desprecia $L_{f,so}$ por su tamaño, pues sus 0.2 mH y los 0.02 mH de línea permanecen en el LCL. El amortiguamiento real incluye también $R_{fc,m} = 0.5\text{ }\Omega$, $R_{fc,s} = 2\text{ }\Omega$ y el controlador.

El valor responde a un compromiso que el Apéndice A.7.6 recorre de forma cerrada sobre el mismo modelo de segundo orden. El máximo resonante M_r se expresa en decibelios para el modelo de segundo orden, según la definición del Apéndice A.7.6. Subir ζ aplanan el *peak* resonante, pero R_v crece con él y con R_v crece la fracción de fundamental que el *washout* deja pasar hacia la tensión formada. Por debajo de $\zeta = 0.4$ la resonancia conserva un *peak* de 2.7 dB . Para $\zeta = 0.6$ el máximo es 0.35 dB , y desaparece en $1/\sqrt{2}$, distinto del amortiguamiento crítico $\zeta = 1$. La sintonía adoptada da 1.25 dB en la reducción y unos 24.2 V de acción a la fundamental. Son estimaciones de diseño, no mediciones del lazo completo. Los ensayos de ventana extendida del Apéndice A.7.3 acotan además hasta dónde alcanza su efecto.

4.5.3. Filtrado washout del amortiguamiento

La resistencia virtual de la ecuación (4.94) amortigua la resonancia, pero lo hace sobre toda la corriente del condensador, incluida su componente fundamental. Y esa componente no es un defecto que corregir sino la corriente reactiva que el condensador necesita en régimen permanente. Restarle una caída proporcional equivale a pedir menos corriente al inductor de la que la carga exige, de modo que el seguimiento queda por debajo de la referencia y, en isla, el maestro entrega menos potencia de la solicitada. Ese es el problema que el *washout* resuelve, separar la parte de $\mathbf{i}_{\text{cap}}$ que conviene amortiguar, el *ripple* de conmutación y la resonancia, de la componente que debe conservarse, la fundamental. Se emplea para ello el pasa-altos de primer orden de la ecuación (3.5) [25], que en tiempo discreto se implementa obteniendo primero la componente lenta con un pasa-bajos

$$\mathbf{i}_{\text{cap}}^{\text{lp}}(k) = \mathbf{i}_{\text{cap}}^{\text{lp}}(k-1) + a_{\text{lp}} \left(\mathbf{i}_{\text{cap}}(k) - \mathbf{i}_{\text{cap}}^{\text{lp}}(k-1) \right), \quad a_{\text{lp}} = \frac{T_s}{\tau_{\text{ad}} + T_s}, \quad (4.96)$$

y el término de amortiguamiento se aplica únicamente sobre la parte rápida, esto es la diferencia entre la corriente del condensador y su componente lenta. El pasa-altos no se implementa de forma explícita, se obtiene como complemento del pasa-bajos, y esa diferencia equivale en tiempo continuo a la transferencia $\tau_{\text{ad}}s/(1+\tau_{\text{ad}}s)$ de la ecuación (3.5). La ecuación (4.96) es su discretización por Euler hacia atrás y admite la forma de promedio ponderado $\mathbf{i}_{\text{cap}}^{\text{lp}}(k) = \frac{\tau_{\text{ad}}}{\tau_{\text{ad}}+T_s} \mathbf{i}_{\text{cap}}^{\text{lp}}(k-1) + \frac{T_s}{\tau_{\text{ad}}+T_s} \mathbf{i}_{\text{cap}}(k)$, cuyos dos pesos suman uno

$$\mathbf{u}_{\alpha\beta}^*(k) = \mathbf{u}_{\alpha\beta}^*(k) - R_v \left(\mathbf{i}_{\text{cap}}(k) - \mathbf{i}_{\text{cap}}^{\text{lp}}(k) \right). \quad (4.97)$$

Las escalas $1/\omega_{\text{res}} = \sqrt{LC}$ son 1.225 ms para el maestro y 0.995 ms para el LC reducido del esclavo. Se adopta $\tau_{\text{ad}} = \tau_{\text{ad},s} = 0.95$ ms, con corte $f_c = 1/(2\pi\tau_{\text{ad}}) = 167.53$ Hz, próximo a ambas sin exigir igualdad exacta. Las ganancias se ajustan por unidad: $R_{v,m} = 2.45 \Omega$ y $R_{v,s} = 3.3 \Omega$. Es una sintonía común evaluada, no una prueba de optimalidad o estabilidad del LCL.

El amortiguamiento como segundo objetivo del costo. La forma de la ecuación (4.97) sugiere que el amortiguamiento se añada *después* de optimizar, como una corrección externa al MPC. No es así, y mostrarlo importa porque de ello depende que el esquema conserve el carácter multiobjetivo propio del control predictivo. Denotando por $\mathbf{i}_{\text{cap}}^{\text{hp}}(k) = \mathbf{i}_{\text{cap}}(k) - \mathbf{i}_{\text{cap}}^{\text{lp}}(k)$ la parte rápida de la corriente del condensador, la ley de la ecuación (4.97) es exactamente el minimizador del costo aumentado

$$g_{\text{ad}}(\mathbf{u}) = \underbrace{\left\| \mathbf{i}_f^{\text{ref}}(k+2) - \hat{\mathbf{i}}_f(k+2|\mathbf{u}) \right\|_2^2}_{\text{seguimiento}} + \underbrace{2b_i R_v \left\langle \mathbf{i}_{\text{cap}}^{\text{hp}}(k), \hat{\mathbf{i}}_f(k+2|\mathbf{u}) \right\rangle}_{\text{amortiguamiento}}, \quad (4.98)$$

como se comprueba anulando su gradiente, que entrega la condición $\mathbf{i}_f^{\text{ref}}(k+2) - \hat{\mathbf{i}}_f(k+2) = b_i R_v \mathbf{i}_{\text{cap}}^{\text{hp}}(k)$ y, sustituida en la ecuación (4.89), reproduce término a término la ecuación (4.97). El segundo sumando penaliza la componente de la corriente predicha alineada con el contenido resonante de la corriente del condensador, que es la definición operativa del amortiguamiento activo. La ponderación relativa entre ambos objetivos no es un

peso libre a sintonizar sino R_v , cuyo valor sale de la ecuación (4.95) y por lo tanto tiene significado físico directo en términos del coeficiente de amortiguamiento ζ .

Dos consecuencias importan. La primera es que el término añadido es lineal en $\mathbf{u}$, de modo que la hessiana de la ecuación (4.87) no cambia, el problema sigue siendo estrictamente convexo y la proyección de la ecuación (4.91) sigue siendo el óptimo restringido. La segunda es de alcance, el lazo de tensión de la Sección 4.5.4 y el integrador de corriente de la Sección 4.5.5 no son términos de este costo sino lazos externos que construyen la referencia $\mathbf{i}_f^{ref}$, en una estructura en cascada convencional. La distinción importa, el costo gobierna el objetivo rápido de seguimiento de corriente y el amortiguamiento de la resonancia, mientras la regulación de amplitud y la anulación del error de régimen se resuelven en lazos más lentos, cuya sintonía es independiente y se documenta por separado.

El efecto del filtro se cuantifica en lugar de describirlo de forma cualitativa. Las dos frecuencias de interés, la fundamental y la resonancia del filtro, están separadas por 1.38 octavas, de modo que **ningún pasa-altos de primer orden puede anular una y conservar la otra**. El objetivo del bloque no es por tanto separar sino fijar un sesgo relativo, que el modelo continuo cuantifica en 2.14 a favor de la banda resonante. La magnitud es 0.613 a 129.9 Hz y 0.286 a 50 Hz. No equivale a un amortiguamiento $\zeta|H|$, porque el filtro también modifica la fase y añade un estado. A la fundamental, la acción virtual baja de 84.7 V a 24.2 V, un 71.4 %, y esa reducción no mide directamente el error de seguimiento. El Apéndice A.7.5 desarrolla el cálculo de las dos transmisiones y su lectura de diseño, y el Apéndice A.7.6 recorre el residuo resultante frente a ζ .

El residuo que sobrevive no tiene que anularlo este bloque. Lo absorbe el lazo externo, el integrador de tensión sobre el eje directo en modo isla de la Sección 4.5.4 y el integrador de la corriente de salida en modo conectado a la red de la Sección 4.5.5, ambos con ganancia infinita en continua sobre el error proyectado. Aumentar τ_{ad} aproxima la realimentación plana y aumenta su acción a la fundamental, mientras reducirlo atenúa también la banda resonante. El error y la estabilidad se evalúan con el lazo completo.

4.5.4. Lazo de tensión grid-forming en modo isla

En isla el maestro forma la tensión de la microrred, pero el MPC modulado controla la corriente del inductor, de modo que la referencia de esa corriente debe construirse desde la tensión que se desea formar. A la compensación capacitiva de la Sección 4.4 se le añade por eso un lazo proporcional que corrige la diferencia entre la tensión de condensador deseada y la medida,

$$\mathbf{i}_f^{ref}(k+2) = \mathbf{i}_o^{ext}(k+2) + \omega C_f^{eff} \mathcal{J} \mathbf{v}_C^{ref}(k+2) + K_v \left(\mathbf{v}_C^{ref}(k+2) - \widehat{\mathbf{v}}_c(k+2) \right), \quad (4.99)$$

donde el operador $\mathcal{J}$ es la rotación de noventa grados en el plano $\alpha\beta$,

$$\mathcal{J} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathcal{J} \mathbf{v} = \begin{bmatrix} -v_\beta \\ v_\alpha \end{bmatrix}, \quad (4.100)$$

es decir, la componente α del resultado toma la β del argumento con signo negativo y la componente β toma la α con signo positivo. Con esa convención $\mathcal{J}$ convierte la tensión en la corriente capacitiva en cuadratura, ωC_f es la admitancia del condensador a la frecuencia

fundamental y K_v es la ganancia del lazo de tensión. El primer término entrega la corriente de salida demandada por la carga, el segundo precompensa la corriente del condensador y el tercero cierra el error de tensión. La corriente y la referencia se proyectan al horizonte $k + 2$.

Cerrando el lazo interno de corriente sobre el predictor del condensador, la dinámica del error de tensión queda gobernada por un polo de primer orden. La recursión del error es

$$e_v(k+1) = \left(1 - \frac{T_s K_v}{C_f}\right) e_v(k), \quad p = 1 - \frac{T_s K_v}{C_f}, \quad (4.101)$$

de donde se despeja directamente la fórmula de diseño $K_v = (1-p) C_f / T_s$. La ganancia se fija entonces imponiendo un polo de lazo cerrado objetivo, con el periodo de muestreo del caso base a $100 \mu s$ el valor $K_v = 1$ situaba el polo en $p = 0.80$. Al adoptar el periodo de muestreo de la comparación justa, $T_s = 214.6 \mu s$, conservar ese mismo polo exige recalcular la ganancia como $K_v = (1-p) C_f / T_s$, lo que da $K_v = 0.466$. Este es el valor adoptado en la configuración final, el criterio es principista, mismo polo de lazo cerrado, y no un ajuste empírico.

Integrador del eje directo del lazo de tensión. Un lazo de tensión puramente proporcional no puede seguir una referencia sinusoidal con error nulo, porque por el *principio del modelo interno* [46] el controlador debería contener el modo $1/(s^2 + \omega_1^2)$ que genera la señal. En el lazo discreto la ganancia del seguimiento a la fundamental es

$$|H(e^{j\omega_1 T_s})| = \frac{|1-p|}{|e^{j\omega_1 T_s} - p|} < 1, \quad (4.102)$$

que con $p = 0.80$ y $T_s = 214.6 \mu s$ vale 0.978, es decir, un déficit de amplitud de régimen del 2.15 % en la tensión formada. Para anularlo se añade al lazo de tensión de la ecuación (4.99) un término integral en el marco sincrónico, donde el error de la fundamental se convierte en una magnitud continua y un integrador de ganancia infinita en continua lo lleva a cero. El error se evalúa sobre la tensión *medida* $\mathbf{v}_C(k)$ frente a su referencia al ángulo actual $\theta_m(k)$, y no sobre la predicción $\hat{\mathbf{v}}_C(k+2)$, para no arrastrar el sesgo que introducen la cadena *deadbeat* y el amortiguamiento activo,

$$e_{v,d}(k) = (v^{ref} \cos(\theta_m(k)) - v_{C,\alpha}(k)) \cos(\theta_m(k)) + (v^{ref} \sin(\theta_m(k)) - v_{C,\beta}(k)) \sin(\theta_m(k)), \quad (4.103)$$

$$\xi_v(k) = \xi_v(k-1) + K_{I,v} e_{v,d}(k) T_s, \quad \xi_v \in \left[-\frac{v_{nom}}{2}, \frac{v_{nom}}{2}\right], \quad (4.104)$$

donde ξ_v es el estado del integrador de tensión, expresado en volts, y su acotamiento actúa como anti-*windup*. El estado corrige la referencia de tensión en el eje directo antes de construir la referencia de corriente, reforzando la amplitud sin alterar la fase impuesta por el ángulo interno,

$$\mathbf{v}_C^{ref'}(k+2) = \mathbf{v}_C^{ref}(k+2) + \xi_v (\cos(\theta_{k2}), \sin(\theta_{k2})), \quad (4.105)$$

con $\theta_{k2} = \theta_m(k) + 2\omega^{ref} T_s$ el ángulo al horizonte $k+2$. La referencia de corriente de la ecuación (4.99) se construye entonces con $\mathbf{v}_C^{ref'}(k+2)$ en lugar de $\mathbf{v}_C^{ref}(k+2)$. Se integra únicamente el eje directo, es decir la amplitud. El eje en cuadratura formaría con él un lazo

acoplado que, con el retardo del *deadbeat*, carece de margen y desestabiliza el seguimiento, de modo que el residuo de fase, del orden de dos grados y común también al Escenario 1, se deja sin corregir. El símbolo ξ_v distingue este integrador del de corriente ξ_d, ξ_q de la Sección 4.5.5 y de los de potencia $\xi_{P,s}, \xi_{Q,s}$ de los esclavos. La ganancia $K_{I,v}$ es propia del modo isla del maestro y en el resto permanece en cero.

Con el término integral el lazo deja de ser de primer orden, de modo que no existe un polo único que despejar como en la ecuación (4.101) ni una fórmula cerrada del tipo $K_v = (1-p)C_f/T_s$. El valor $K_{I,v} = 50$ se declara por lo tanto como **parámetro ajustado**, guiado por separación de escalas de tiempo respecto del lazo proporcional, y no como resultado de un cálculo, a diferencia de K_v, R_v y ζ .

La suma de los dos términos es lo que el diagrama de bloques identifica como lazo PI de tensión. La parte proporcional actúa sobre el error instantáneo en $\alpha\beta$ y fija el polo de la ecuación (4.101), mientras la parte integral actúa solo sobre la amplitud del eje directo y corrige la referencia, no la acción de control. En modo conectado a la red el maestro no emplea este lazo, sino la acción puramente integral sobre la corriente de salida de la Sección 4.5.5, que sí se suma a la tensión de referencia del modulador.

El límite de la ecuación (4.104) se fija en 110 V, la mitad de la tensión nominal de fase, y actúa como anti-*windup*. **El estado del integrador se suma a la referencia y no a la acción de control**, de manera que el recorte acota la amplitud que el lazo puede llegar a perseguir y no la tensión que el puente sintetiza. El Apéndice A.7.4 precisa el margen que ese valor concede y el ensayo de atribución que descarta al integrador como causa de la divergencia en los niveles altos de perturbación.

4.5.5. Seguimiento de la corriente de salida en modo conectado a la red

Con las etapas anteriores las formas de onda mejoran de manera notable, pero en modo conectado a la red persistía un problema central, la corriente de salida del maestro no alcanzaba su referencia y el convertidor entregaba más potencia que la consigna. Una explicación estructural compatible con este comportamiento surge de la relación entre las corrientes del filtro. La corriente de salida es la diferencia entre la corriente del inductor y la corriente del condensador de la ecuación (4.93), ambas son grandes y de magnitud similar, por lo que su diferencia es sensible a pequeños errores de fase. El *feedforward* capacitivo de la Sección 4.4 aproxima la corriente del condensador, pero una desviación pequeña basta para alejar la corriente de salida de su referencia. El control *deadbeat* del inductor no elimina este error porque actúa sobre otra variable.

La solución traslada el control a la corriente de salida y lo formula en el marco sincrónico que gira con la red. En ese marco una señal sinusoidal de frecuencia fundamental se ve como una magnitud continua, y un integrador sobre una magnitud continua lleva el error a cero en régimen sin depender de la fase de la planta a esa frecuencia. La corriente de salida y su referencia se proyectan al marco sincrónico con la transformada de Park [25], que con el ángulo θ de la red se escribe

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix}, \quad (4.106)$$

con $\theta = \theta_{\text{pll}}$ en el maestro conectado a la red y $\theta = \theta_{\text{sync}}$ en el esclavo, ambos provistos

por la sincronización descrita en la etapa preliminar del Escenario 1. Sobre el error de la corriente de salida en cada eje se integra un estado

$$\xi_\nu(k+1) = \xi_\nu(k) + K_I \left(i_{o,\nu}^{ref}(k) - i_{o,\nu}(k) \right) T_s, \quad \xi_\nu \in \left[-\frac{V_{dc}}{2}, \frac{V_{dc}}{2} \right], \quad \nu \in \{d, q\}, \quad (4.107)$$

donde K_I es la ganancia integral y el acotamiento del estado actúa como anti-*windup*. La ganancia K_I se fija por separación de escalas de tiempo respecto al lazo *deadbeat* de corriente, cuyo ancho de banda es del orden de $1/T_s$. La acción integral se diseña un orden de magnitud más lenta que ese lazo interno, de modo que corrige el sesgo de régimen sin erosionar el margen del control rápido. Los valores $K_{I,m} = 300$ en el maestro y $K_{I,s} = 10$ en los esclavos respetan esa separación, con una acción más suave en los seguidores. La corrección se devuelve a coordenadas estacionarias con la transformada inversa de Park y se suma a la tensión de referencia

$$\mathbf{u}_{\alpha\beta}'^*(k) = \mathbf{u}_{\alpha\beta}^*(k) + \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi_d \\ \xi_q \end{bmatrix}. \quad (4.108)$$

La ecuación (4.108) devuelve la corrección a coordenadas estacionarias con la transformada inversa de Park y la suma a la tensión de referencia, de modo que el integrador vive en dq , donde la componente de 50 Hz es constante y puede anularse, y actúa en $\alpha\beta$, donde el modulador la necesita.

El lazo opera en el maestro solo en modo conectado a la red, porque en isla forma tensión, y en los esclavos en ambos modos, porque siempre siguen la del PCC. Es la única acción integral sobre la corriente de los esclavos en las campañas. Un integrador externo de potencia sobre sus potencias filtradas llegó a considerarse y quedó descartado.

4.5.6. Caso base nominal del Escenario 2

La Tabla 4.6 reúne los valores utilizados en el caso base nominal y la función metodológica de cada uno.

Tabla 4.6

PARÁMETROS DEL CASO BASE NOMINAL DEL ESCENARIO 2 Y CRITERIO DE SELECCIÓN, AGRUPADOS POR BLOQUE FUNCIONAL.

Parámetro	Valor	Criterio de selección
<i>Modulación y temporización</i>		
Modulación en maestro y esclavos	Sí	Concentra el <i>ripple</i> de conmutación en la portadora y reduce la distorsión de corriente.
Muestreo del modulador	<i>double-update</i>	Dos actualizaciones por ciclo de portadora, con el periodo de control ligado a la portadora mediante $T_s = 1/(2f_c)$.
Portadora f_c	2.33 kHz	Igualada a la conmutación efectiva medida del Escenario 1, Sección 4.5.1.
Periodo de muestreo T_s	214.6 μ s	Resulta de $T_s = 1/(2f_c)$ con el muestreo <i>double-update</i> .
<i>Lazo de tensión</i>		
Ganancia proporcional K_v	0.466	Polo objetivo $p = 0.80$, Sección 4.5.4.
Ganancia integral $K_{I,v}$ (isla, maestro)	50	Anula el déficit de amplitud del proporcional. Ajustado por separación de escalas, no derivado.
<i>Amortiguamiento activo</i>		
Amortiguamiento de diseño ζ (modelo auxiliar)	0.5	Compromiso del modelo auxiliar, con máximo de 1.25 dB antes del <i>washout</i> , y no es el amortiguamiento medido del lazo completo.
Resistencia virtual del maestro $R_{v,m}$	2.45 Ω	De la ecuación (4.95) con $\zeta = 0.5$.
Resistencia virtual del esclavo $R_{v,s}$	3.3 Ω	Igual criterio con $\sqrt{L_{f,s}/C_{f,s}}$ del LC reducido, no con una impedancia equivalente del LCL completo.
Constante del filtro <i>washout</i> τ_{ad}	0.95 ms	Común a maestro y esclavos, con corte continuo de 167.53 Hz. Atenúa la fundamental sin anularla.
Razón de favorecimiento del <i>washout</i>	2.14	Cociente 0.613/0.286 de la ecuación (A.5).
<i>Lazos integrales de corriente</i>		
Ganancia integral del maestro $K_{I,m}$	300	Fijada por separación de escalas respecto al lazo <i>dead-beat</i> de corriente, de ancho de banda $\sim 1/T_s$, para que la corriente de salida alcance su referencia en modo conectado a la red sin erosionar el margen del lazo rápido.
Ganancia integral del esclavo $K_{I,s}$	10	Misma separación de escalas, con acción más suave para que cada esclavo entregue su cuota de potencia con error reducido.

Al no incorporar una segunda acción integral externa sobre las potencias se evita atribuir a la identificación cambios que procederían de otra resintonía entre escenarios.

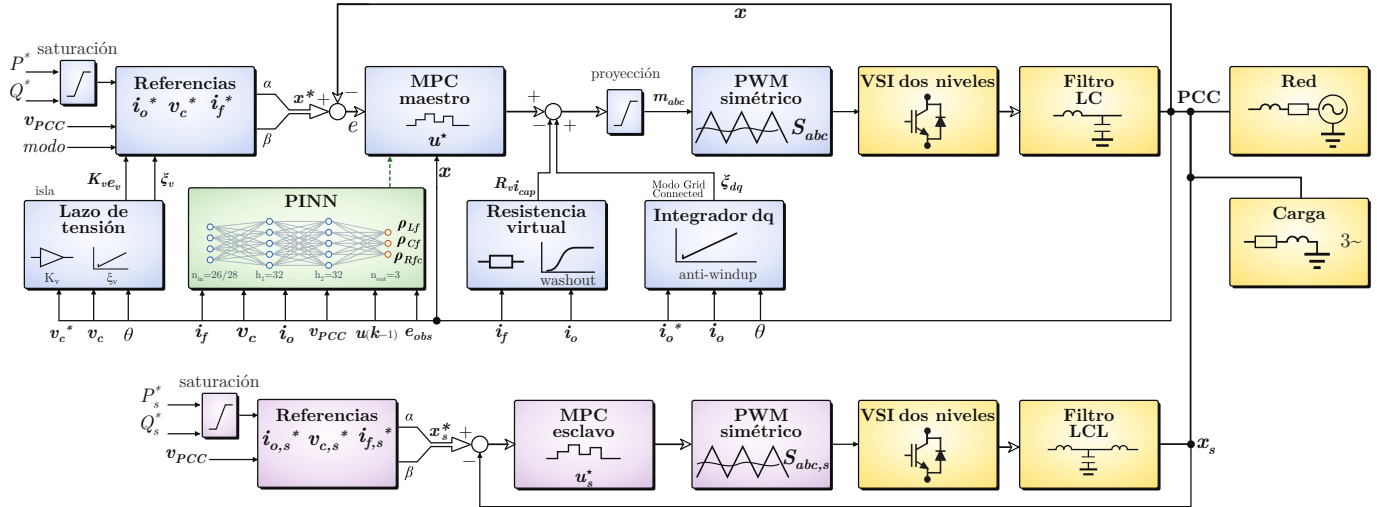


Figura 4.6. Diagrama de bloques del Escenario 2.

Diagrama de bloques de la arquitectura. La Figura 4.6 cierra la sección con la estructura de control del escenario modulado, dibujada en el mismo lenguaje gráfico que la Figura 4.4 para que la comparación entre ambos se lea por diferencia.

Dentro de una muestra el maestro recorre los bloques en un orden fijo, y eso explica por qué el estado medido entra al bloque del MPC y no solo al comparador. Primero se leen las medidas y se ejecuta la inferencia, que entrega los coeficientes del modelo, ecuación (4.24). Con ellos y con el estado medido se propaga la dinámica un paso, ecuaciones (4.26) y (4.30). Solo entonces se construye la referencia y se resuelve la ley *deadbeat* de la ecuación (4.89), que resta la corriente *predicha* y no la medida. Sin estado medido no hay predicción, y sin predicción no hay ley de control. La tensión resultante recibe dos correcciones en el sumador que le sigue, el amortiguamiento de la ecuación (4.97) que se resta y el término integral de la ecuación (4.108) que se suma, se acota por la proyección de la ecuación (4.91) y se normaliza a los índices m_{abc} . Al bloque de resistencia virtual entran i_f e i_o porque la corriente sobre la que actúa no se mide y se forma como su diferencia, ecuación (4.93).

Los tres lazos externos difieren en qué corrigen. La distinción es la que gobierna la lectura del dibujo y reaparece en el Capítulo 5. La proporcional K_v y la integral ξ_v actúan sobre la *referencia*, ecuaciones (4.99), (4.104) y (4.105), y por eso el bloque de lazo de tensión entrega sus flechas al de referencias y ninguna al sumador del modulador. El integrador dq actúa sobre la *actuación*, ecuación (4.107). Ambos necesitan el ángulo θ porque trabajan sobre magnitudes sinusoidales y un integrador solo anula el error de una senoide donde esa señal es continua, el primero para proyectar el error sobre el eje directo y el segundo para ir y volver del marco que gira con la red.

Un solo diagrama sirve para los dos modos, con las notas sobre los bloques declarando qué queda activo en cada régimen. El lazo de tensión solo en isla, el integrador dq solo en modo conectado a la red y el amortiguamiento siempre. Los esclavos replican la cadena modulada sobre su filtro LCL, sin lazo de tensión por ser seguidores, y conservan su acción integral en los dos modos con la ganancia más suave de la Tabla 4.6.

4.6. Formulación del ajuste paramétrico informado por física

El predictor del MPC depende de los parámetros del filtro. Cuando la planta se aparta del modelo nominal, la acción de control se calcula con coeficientes que ya no representan la dinámica observada. La metodología adoptada introduce una red neuronal informada por física que identifica factores efectivos del filtro y actualiza el predictor, sin reemplazar la función de costo ni la selección de la acción de control.

La Sección 3.4 recoge el criterio con que la red neuronal informada por física se prefirió frente a un observador de Kalman o un estimador ARX–RLS. Queda por resolver cuál de sus dos arquitecturas se adopta, cómo entra la física en el ajuste y qué alcance tiene el resultado, que es lo que esta sección desarrolla.

4.6.1. Familias de PINN y formulación supervisada del problema inverso

El nombre *PINN inversa* designa dos arquitecturas distintas, y precisar cuál se usa importa porque de ello dependen la función de pérdida, el papel de sus pesos y la posibilidad misma de ejecutar el identificador dentro de un lazo de control. En la **familia A** la red neuronal aproxima la *solución* de la ecuación diferencial y los parámetros físicos se convierten en parámetros entrenables, de manera que la identificación se resuelve minimizando conjuntamente sobre pesos y parámetros,

$$\left(\theta^{ref}, \theta_0^{ref}\right) = \arg \min_{\theta, \theta_0} \mathcal{L}(u_{NN}(\theta); \theta_0), \quad (4.109)$$

donde θ son los pesos de la red neuronal, θ_0 los parámetros físicos buscados y el asterisco marca los valores que minimizan la pérdida. Es la formulación original [31] y la que sigue la literatura reciente de problemas inversos [47]. El parámetro es aquí una incógnita más del entrenamiento, de modo que el entrenamiento *es* la inversión, cada conjunto de mediciones exige una optimización completa y el resultado es el parámetro para ese conjunto.

En la **familia B** la red neuronal no representa la solución sino el operador que va de una ventana de mediciones al parámetro que la explica,

$$f_{\theta} : z(k) \mapsto \eta(k) = \ln \rho(k). \quad (4.110)$$

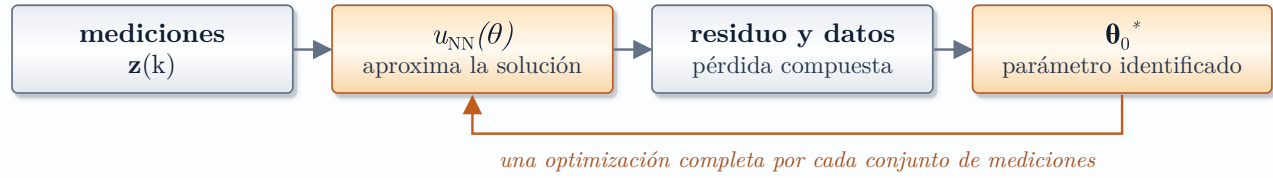
Se ajusta una sola vez sobre una familia de plantas cuyos factores se conocen y en operación entrega el parámetro en una evaluación directa, sin optimización alguna. Es la forma que adopta el trabajo de estimación de L y C en un inversor trifásico [33]. La Figura 4.7 contrapone los dos flujos y separa en el segundo lo que ocurre fuera de línea una sola vez de lo que ocurre en cada muestra.

Las dos familias de red informada por física para el problema inverso

Familia A, la red aproxima la solución

el parámetro es una incógnita más del entrenamiento

$$(\theta^*, \theta_0^*) = \arg \min L(u_{NN}(\theta); \theta_0)$$



Familia B, la red aproxima el mapa de medición a parámetro

adoptada en esta memoria

$$f_\theta : \mathbf{z}(k) \rightarrow \boldsymbol{\eta}(k) = \ln \boldsymbol{\rho}(k)$$

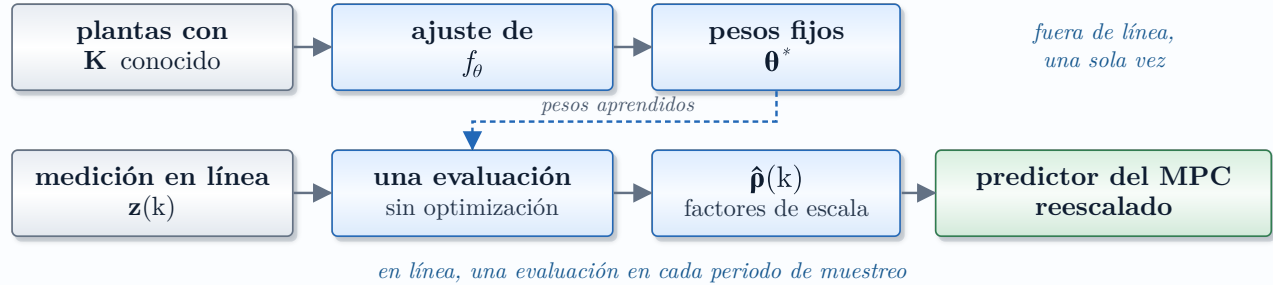


Figura 4.7. Las dos familias de red informada por física para el problema inverso.

La Tabla 4.7 contrasta ambas familias frente a los requisitos que impone un identificador que opera dentro del lazo de control.

Tabla 4.7

COMPARACIÓN DE LAS DOS FAMILIAS FRENTE A UN IDENTIFICADOR DENTRO DEL LAZO.

Criterio	Familia A, solución aproximada	Familia B, mapa aprendido
Qué representa la red neuronal	La solución de la ecuación	El operador de medición a parámetro
Dónde vive el parámetro	Variable entrenable de la red neuronal	Salida de la red neuronal
Coste por identificación	Una optimización completa	Una evaluación directa
Supervisión del parámetro	No existe, es la incógnita	Etiqueta conocida de la campaña
Planteamiento	Puede quedar mal condicionado	Bien planteado por la supervisión
Papel del término físico	Fija el parámetro, es indispensable	Regulariza, no identifica
Ejecución dentro del lazo	No viable	Viable
Generaliza a mediciones nuevas	Requiere reoptimizar	Directa, si están en la envolvente

El reparto de ventajas es nítido. La familia A no necesita etiquetas, de modo que se aplica cuando el parámetro verdadero se desconoce por completo, y ajusta cada caso con

toda la capacidad de la red neuronal. Sus dos costes son que el parámetro no está observado, con lo que el problema puede admitir varias soluciones compatibles con los datos, y que una optimización completa por cada ventana de medición no cabe en un periodo de control. La familia B invierte el reparto, renuncia a ajustar cada caso por separado y a cambio aprende el mapa una sola vez, con lo que la identificación en operación cuesta lo que cuesta evaluar una expresión algebraica. El Capítulo 4 recoge esa elección y desarrolla la implementación.

Aprendizaje supervisado informado por física. La PINN resuelve un problema inverso supervisado. Durante la generación de datos se conocen los factores que se aplican a la planta, agrupados en el vector $\mathbf{K}$, cuyas componentes K_{Lf} , K_{Cf} y K_{Rfc} multiplican respectivamente la inductancia, la capacitancia y la resistencia de rama nominales. La etiqueta que la red neuronal debe recuperar es su logaritmo, porque trabajar en escala logarítmica hace simétricos los desajustes por exceso y por defecto,

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} K_{Lf} & K_{Cf} & K_{Rfc} \end{bmatrix}^T, \quad \boldsymbol{\eta}_{\text{true}} = \log(\mathbf{K}). \quad (4.111)$$

A partir de mediciones instantáneas y memoria de un paso la red neuronal entrega su estimación $\hat{\boldsymbol{\eta}}(k)$, donde el acento distingue lo estimado de lo verdadero, y el factor efectivo se recupera por exponenciación,

$$\hat{\boldsymbol{\rho}}(k) = \exp(\hat{\boldsymbol{\eta}}(k)). \quad (4.112)$$

La física interviene durante el entrenamiento mediante el residuo del predictor discreto. En operación en línea no se optimizan pesos ni se evalúa la función de pérdida, por lo que el término físico condiciona el ajuste sin añadir cálculos al control. La supervisión paramétrica aporta la referencia directa de los factores y el residuo físico actúa como regularizador dinámico. El reparto entre ambos objetivos no se fija mediante dos constantes. Se aprende junto con la red neuronal mediante la formulación balanceada que se desarrolla en la Sección 4.6.6.

4.6.2. Modelo discreto, reescalado y espacio de perturbación

Para escribir el predictor en línea se define primero la corriente de la rama capacitiva,

$$\mathbf{d}(k) = \mathbf{i}_f(k) - \mathbf{i}_o(k). \quad (4.113)$$

Con muestreo T_s , la corriente del inductor se aproxima mediante Euler hacia adelante [48],

$$\hat{\mathbf{i}}_f(k+1) = a_i^{eff}(k)\mathbf{i}_f(k) + b_i^{eff}(k) \left[\mathbf{u}(k) - \mathbf{v}_C(k) - R_{fc}^{eff}(k)\mathbf{d}(k) \right], \quad (4.114)$$

donde

$$a_i^{eff}(k) = 1 - \frac{R_f T_s}{L_f^{eff}(k)}, \quad b_i^{eff}(k) = \frac{T_s}{L_f^{eff}(k)}. \quad (4.115)$$

El predictor en línea propaga la tensión medida del condensador de forma directa,

$$\hat{\mathbf{v}}_C(k+1) = \mathbf{v}_C(k) + b_c^{eff}(k)\mathbf{d}(k), \quad (4.116)$$

con

$$b_c^{eff}(k) = \frac{T_s}{C_f^{eff}(k)}. \quad (4.117)$$

La resistencia no aparece en esta transición porque $\mathbf{v}_C$ es el estado del condensador. Cuando la predicción de corriente necesita la tensión del extremo del inductor, el C-Script reconstruye la rama como $\hat{\mathbf{v}}_c = \hat{\mathbf{v}}_C + R_{fc}\hat{\mathbf{d}}$.

La pérdida física utiliza una realización equivalente. El constructor del conjunto reconstruye, solo en sus arreglos auxiliares,

$$\mathbf{v}_c(j) = \mathbf{v}_C(j) + R_{fc}\mathbf{d}(j), \quad (4.118)$$

y sobre esa coordenada evalúa la transición medida desde $k-1$ hasta k , con los parámetros inferidos mantenidos constantes durante ese paso,

$$\hat{\mathbf{v}}_c(k) = \mathbf{v}_c(k-1) + b_c^{eff}(k)\mathbf{d}(k-1) + R_{fc}^{eff}(k)[\mathbf{d}(k) - \mathbf{d}(k-1)], \quad (4.119)$$

donde $R_{fc}^{eff} = R_{fc}$ en los modelos finales. La predicción de corriente empleada por el residuo es

$$\hat{\mathbf{i}}_f^{phys}(k) = a_i^{eff}(k)\mathbf{i}_f(k-1) + b_i^{eff}(k)[\mathbf{u}(k-1) - \mathbf{v}_c(k-1)], \quad (4.120)$$

Esta escritura fija el reparto de R_{fc} . En la transición de corriente aparece dentro de $\mathbf{v}_c$, porque esa es la tensión que ve el inductor. En la de tensión el término incremental no introduce una dinámica adicional. Al sustituir la ecuación (4.118) en (4.119), $R_{fc}\mathbf{d}(k)$ se cancela en ambos lados y queda $\hat{\mathbf{v}}_c(k) = \mathbf{v}_c(k-1) + b_c^{eff}(k)\mathbf{d}(k-1)$. Es la misma aproximación de Euler de la ecuación (4.116), ahora aplicada al paso pasado que se contrasta con la medida. El MPC predice el paso futuro y la pérdida evalúa un paso ya registrado. Esta distinción temporal evita mezclar $k-1$, k y $k+1$ dentro de una sola transición.

La tensión aplicada que alimenta la ecuación (4.120) conserva la diferencia entre escenarios. En el conjunto finito se usa el vector aplicado durante el periodo anterior. En el esquema modulado se usa el promedio de los dos mandos más recientes, coherente con la portadora simétrica y la doble actualización. Esta es la única diferencia entre las ecuaciones físicas de las dos PINN.

Los factores inferidos reescalan los parámetros nominales del predictor,

$$\begin{aligned} L_f^{eff}(k) &= \rho_{Lf}(k) L_f, \\ C_f^{eff}(k) &= \rho_{Cf}(k) C_f, \\ R_{fc}^{eff}(k) &= \rho_{Rfc}(k) R_{fc} = R_{fc}. \end{aligned} \quad (4.121)$$

Antes de actualizar el predictor, cada factor se limita a la banda entrenada y se filtra con una constante de tiempo de 2 ms. Esta etapa reduce cambios bruscos entre muestras sin alterar la estructura del MPC.

Parámetro efectivo. En cada corrida principal el factor de planta es constante, de modo que ρ_{Lf} y ρ_{Cf} representan el parámetro efectivo en ese punto de operación. Se consideran desviaciones lentas por tolerancia, envejecimiento o temperatura, no la variación intraperiodo de la saturación magnética. Esta exigiría una dependencia del estado dentro del horizonte. La Sección 5.9.5 evalúa adicionalmente escalones y rampas de parámetros efectivos, y sus límites se recogen en el Capítulo 6.

Por qué el factor se mantiene fijo dentro del horizonte. Los factores se infieren una vez por periodo de muestreo y se aplican sin recalcular a lo largo de los pasos $k+1$ a $k+3$. La razón es física. Un factor de escala describe el estado del componente reactivo y no una variable de estado, de modo que no cambia en los centenares de microsegundos que abarca el horizonte. Lo que sí evoluciona dentro del horizonte es el vector de estado, y esa evolución ya la propaga el predictor. El filtro de 2 ms recién descrito formaliza la misma hipótesis, tratar el factor como una magnitud lenta frente al muestreo. Recalcularlo en cada paso obligaría además a alimentar la PINN con estados predichos en lugar de medidos, fuera del dominio en que fue ajustada, y triplicaría el costo de inferencia dentro de un lazo que ya resuelve una optimización por periodo.

Qué es bidimensional y qué no. La capa de salida tiene tres neuronas, pero el problema final es bidimensional tanto en la perturbación como en la actuación paramétrica. Como $K_{Rfc} = 1$ en todas las muestras, $\mu_{y,Rfc} = 0$ y $\sigma_{y,Rfc} = 0$, y la desnormalización anula cualquier valor crudo de esa neurona y entrega $\rho_{Rfc} = 1$ exactamente. Los encabezados de los dos escenarios exportan esos dos ceros. La tercera neurona se conserva para no alterar la arquitectura ni la interfaz de exportación, pero no es un identificador activo en los modelos desplegados, la rama sigue representada con su resistencia nominal y ninguna conclusión se apoya en esa salida.

Parámetros fuera del espacio principal de perturbación y evaluación. El filtro del maestro tiene cuatro parámetros, L_f , C_f , R_f y R_{fc} , y la campaña perturba y evalúa solo los dos reactivos. R_f permanece nominal y no es salida de la PINN. R_{fc} permanece nominal en la planta y en el predictor. Dos argumentos independientes sostienen esa restricción, en línea con trabajos de estimación paramétrica de filtros que concentran el espacio evaluado en los elementos reactivos [33].

El primero es que R_{fc} no es el mecanismo de degradación estudiado. Agrupa la resistencia serie total de la rama capacitiva, dominada por el amortiguamiento especificado y no por la resistencia parásita del condensador, y con $Z_0 = \sqrt{L_f/C_f} = 2.45 \Omega$ el valor implementado da $\zeta_{fc} = R_{fc}/(2Z_0) = 0.102$, propio de un amortiguamiento pasivo de rama. Perturbarla atribuiría a una sola magnitud una elección de diseño y una contribución parásita, que son fenómenos distintos.

El segundo es de observabilidad y se desarrolla en el Apéndice A.6. En el predictor de tensión la contribución de C_f multiplica el valor de la corriente de rama, mientras la de R_{fc} multiplica solo su diferencia entre muestras consecutivas. El cociente entre ambos aportes resulta ser el número adimensional $R_{fc}\omega C_f$, que vale 0.079 a 50 Hz, no depende del periodo de muestreo y alcanza la unidad en 637 Hz. La información sobre R_{fc} reside por tanto en el *ripple* de conmutación y no en la componente que domina la señal, de modo que su identificabilidad depende del esquema de conmutación. El Capítulo 5 comprueba que el conjunto finito, de espectro disperso, la favorece, mientras el MPC modulado la reduce al concentrar y amortiguar ese *ripple*. Un parámetro puede ser perfectamente estable y estar perfectamente definido y aun así no ser recuperable de las señales disponibles, y esa frontera de observabilidad es distinta de la de estabilidad y de la de margen de actuación.

Observabilidad, identificabilidad y excitación. La **observabilidad** permite reconstruir el estado a partir del modelo y las medidas. La **identificabilidad** exige que distintos paráme-

tros produzcan salidas distinguibles. La **persistencia de excitación** caracteriza la amplitud y el contenido frecuencial necesarios para estimar con varianza acotada. Un parámetro identificable puede estimarse mal por excitación insuficiente, hipótesis examinada para el modulado en isla en el Capítulo 5. Para R_{fc} , el predictor presenta sensibilidad débil a la fundamental. El análisis del paisaje de la función de pérdida en la identificación por red neuronal informada por física de un convertidor conmutado llega a la misma conclusión por otra vía, unos parámetros dejan una huella nítida en el residuo y otros apenas lo alteran [49].

El tercer argumento es empírico y queda en el mismo apéndice. De allí se retiene que perturbar R_{fc} de forma axial no produce un solo nivel de rescate, y que una pareja de conjuntos que difiere *únicamente* en el sentido del factor aplicado a ese parámetro cambia de forma apreciable la cobertura de compensación.

El caso de R_f es distinto, porque el argumento intuitivo es incorrecto. Su variación térmica es real, del orden del 23 % para un calentamiento de 60 K, pero la resistencia compite con la reactancia del inductor en una relación de 1.3 %, de modo que ese cambio desplaza la impedancia de la rama serie un 0.3 %, por debajo de la resolución con que el identificador distingue factores. La formulación correcta no es que R_f no varíe, sino que *su variación es real, acotada e indetectable*. El desglose numérico está también en el Apéndice A.6.

Los dos parámetros excluidos permanecen en la planta simulada, en el filtro físico y en las ecuaciones discretas del predictor con su valor nominal. Lo que se retira es exclusivamente su factor de escala, es decir, la pretensión de estimarlos en línea.

4.6.3. Vector de entrada, arquitectura y tamaño de la red neuronal

La entrada combina el estado medido, la acción aplicada, la memoria de un paso, derivadas discretas y errores de observación. En forma compacta,

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_0(k) &= [\mathbf{i}_f(k), \mathbf{v}_C(k), \mathbf{i}_o(k), \mathbf{u}(k-1), \mathbf{v}_{PCC}(k)]^\top, \\ \mathbf{x}_1(k) &= [\mathbf{i}_f(k-1), \mathbf{v}_C(k-1), \mathbf{i}_o(k-1), \mathbf{u}(k-2)]^\top, \\ \mathbf{z}_m(k) &= [\mathbf{x}_0^\top(k), \mathbf{x}_1^\top(k), \Delta \mathbf{i}_f^\top(k), \Delta \mathbf{v}_C^\top(k), \mathbf{e}_{v,\text{obs}}^\top(k), \mathbf{q}_m^\top(k)]^\top, \end{aligned} \quad (4.122)$$

donde $\mathbf{x}_0(k)$ reúne el estado medido y la acción aplicada en el instante actual, $\mathbf{x}_1(k)$ las mismas magnitudes retrasadas un paso, $\Delta \mathbf{i}_f$ y $\Delta \mathbf{v}_C$ sus diferencias entre muestras consecutivas, $\mathbf{e}_{v,\text{obs}}$ el error entre la tensión de condensador medida y la que el predictor nominal anticipaba, y $\mathbf{q}_m(k)$ las potencias y referencias propias de cada modo. Este último bloque merece precisarse, porque acota el alcance de lo que la corrección puede afirmar. En modo conectado a la red vale $\mathbf{q}_m = [P^{ref}, Q^{ref}]^\top$, y en isla añade las potencias filtradas, $\mathbf{q}_m = [P_{filt}, Q_{filt}, P^{ref}, Q^{ref}]^\top$. Son las consignas *sin saturar*, tomadas antes de la rutina de reparto, de modo que un cambio en esa rutina no altera lo que la red neuronal observa. Lo que sí lo altera es el rango numérico que esas consignas recorren, y por eso el rango con que se ajustaron acota los niveles de despacho sobre los que la identificación es interpretable, cuestión que la Sección 5.8.1 cuantifica. Las diferencias y el error de observación son las componentes que llevan la información del desajuste, porque dependen de los parámetros del filtro y no solo del punto de operación. La PINN de modo conectado a la red utiliza 26 entradas y la de isla 28. Antes de entrar a la red el vector se normaliza con la media

μ_z y la desviación típica σ_z del conjunto de entrenamiento, componente a componente,

$$z_n(k) = \frac{z_m(k) - \mu_z}{\sigma_z}. \quad (4.123)$$

Se entrenan dos redes independientes, una para conexión a red y otra para isla. Cada una utiliza dos capas ocultas de 32 neuronas con activación tangente hiperbólica y una capa de salida lineal de tres neuronas. El controlador aplica las tres componentes según la ecuación (4.121). La campaña, las métricas y las conclusiones evalúan las dos primeras,

$$\hat{\eta}(k) = \mathbf{W}_3 \tanh[\mathbf{W}_2 \tanh(\mathbf{W}_1 \mathbf{z}_n(k) + \mathbf{b}_1) + \mathbf{b}_2] + \mathbf{b}_3. \quad (4.124)$$

donde $\mathbf{W}_1$, $\mathbf{W}_2$ y $\mathbf{W}_3$ son las matrices de pesos y $\mathbf{b}_1$, $\mathbf{b}_2$ y $\mathbf{b}_3$ los vectores de sesgo de las tres capas, en la notación general de la ecuación (3.8). Las matrices se inicializan mediante Glorot, también denominado Xavier, con una escala acorde con las dimensiones de entrada y salida de cada capa. Los vectores de sesgo se inicializan en cero. Esta elección coincide en las redes del maestro y de los esclavos y deja la diferencia entre ellas restringida a la dimensión del vector de entrada y a sus datos de ajuste.

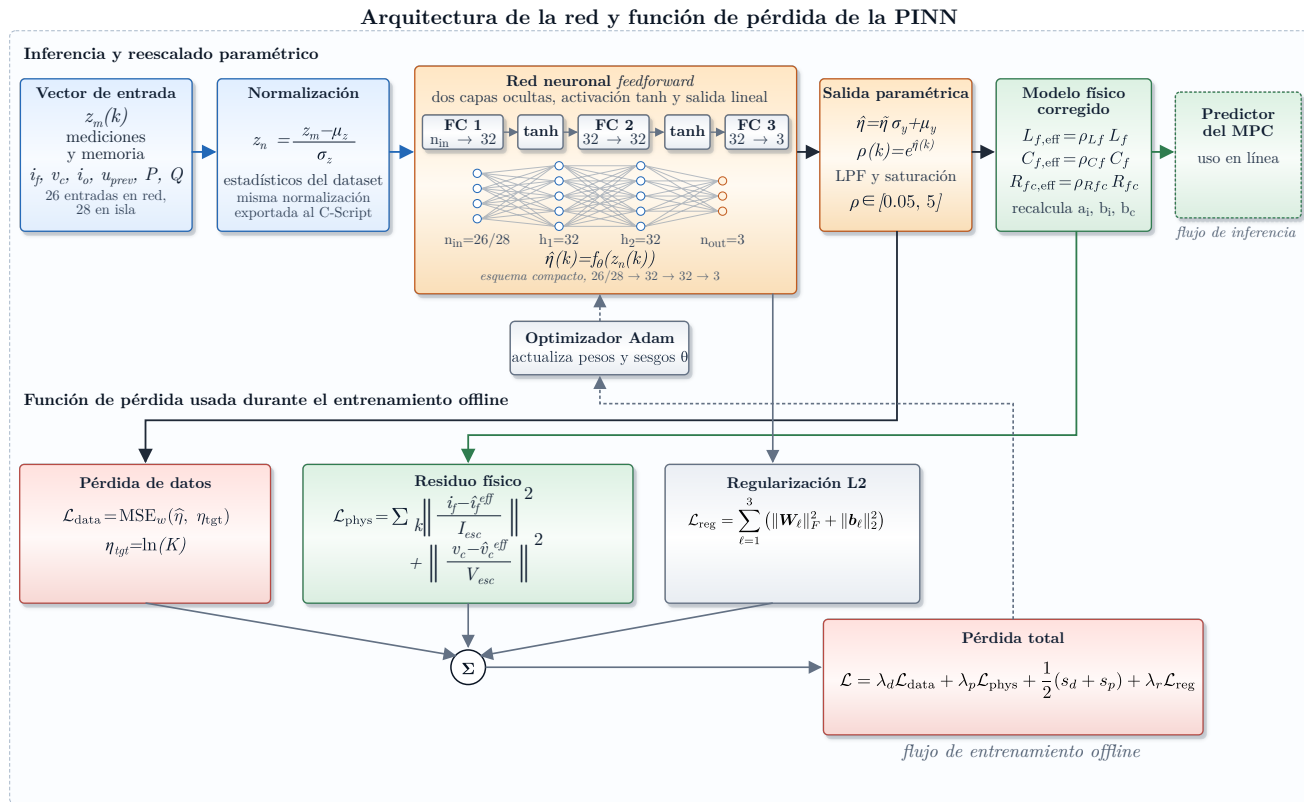


Figura 4.8. Arquitectura y función de pérdida de la PINN.

La Figura 4.8 separa el flujo de inferencia del flujo de entrenamiento. La rama superior transforma las mediciones normalizadas en factores físicos y coeficientes efectivos. La rama inferior combina supervisión paramétrica, coherencia con el predictor y regularización. Adam actualiza fuera de línea los pesos y sesgos de la red junto con s_d y s_p , que determinan

los pesos aprendibles de los términos de datos y física. El término de regularización cumple una función distinta de los otros dos. No impone sentido físico ni acerca la salida a la etiqueta, sino que penaliza pesos grandes para contener el sobreajuste a la campaña de entrenamiento. Su peso permanece fijo en $\lambda_r = 10^{-5}$ y queda fuera del reparto aprendible, que solo arbitra entre datos y física.

Composición del vector de entrada. La ecuación (4.122) define $\mathbf{z}_m$ por bloques. La Tabla 4.8 lo desarrolla componente a componente, en el mismo orden en que el controlador lo construye, porque ese orden es parte del contrato entre el modelo ajustado y su implementación y cualquier permutación invalidaría la inferencia.

Tabla 4.8
COMPONENTES DEL VECTOR DE ENTRADA DE LA PINN, EN SU ORDEN DE CONSTRUCCIÓN.

Índice	Magnitud	Papel	Unidad
0–1	$\mathbf{i}_f(k)$	estado medido	A
2–3	$\mathbf{v}_C(k)$	estado medido	V
4–5	$\mathbf{i}_o(k)$	estado medido	A
6–7	$\mathbf{u}(k-1)$	acción aplicada	V
8–9	$\mathbf{v}_{PCC}(k)$	medida de red	V
10–17	$\mathbf{i}_f(k-1), \mathbf{v}_C(k-1), \mathbf{i}_o(k-1), \mathbf{u}(k-2)$	memoria de un paso	A, V
18–19	$[\mathbf{i}_f(k) - \mathbf{i}_f(k-1)]/T_s$	derivada discreta	A/s
20–21	$[\mathbf{v}_C(k) - \mathbf{v}_C(k-1)]/T_s$	derivada discreta	V/s
22–23	$\mathbf{e}_{v,\text{obs}}(k)$	error de observación	V
24–25	P^{ref}, Q^{ref} en modo conectado a la red	consigna supervisora	W, VAR
24–27	$P_{filt}, Q_{filt}, P^{ref}, Q^{ref}$ en modo isla	consigna y potencia medida	W, VAR

Los índices 0–23 son doce pares $\alpha\beta$. En red, P^{ref} y Q^{ref} ocupan los índices 24 y 25, y son escalares independientes, no otro vector. En isla se añaden P_{filt} y Q_{filt} . Así se obtienen 26 entradas en red y 28 en isla: doce magnitudes vectoriales más dos o cuatro escalares. Conviene precisar dos de las vectoriales. Las componentes 18 a 21 son derivadas discretas, es decir la diferencia entre muestras *dividida por* T_s , y no la diferencia sin normalizar. Las componentes 22 y 23 son el error de observación,

$$\mathbf{e}_{v,\text{obs}}(k) = \mathbf{v}_C(k) - \left[\mathbf{v}_C(k-1) + b_c(\mathbf{i}_f(k-1) - \mathbf{i}_o(k-1)) \right], \quad (4.125)$$

esto es la diferencia entre la tensión medida y la que el predictor *nominal* anticipaba un paso antes. Estas dos familias son las que llevan la información del desajuste, porque la ecuación (4.125) se anula cuando el filtro real coincide con el modelo y crece con la discrepancia, mientras el resto de las componentes describe el punto de operación. Esa separación es la razón por la que la identificación es posible sin excitar la planta con señales adicionales.

La red neuronal observa exactamente lo que observa el controlador. Conviene dejar explícito, porque de ello depende que la corrección sea aplicable en línea, que el canal de tensión del vector de entrada es la tensión del condensador $\mathbf{v}_C$ en crudo, la misma que el voltímetro entrega al C-Script y la misma sobre la que el MPC evalúa su término de costo. El

voltímetro está conectado en paralelo con C_f , de modo que la caída $R_{fc}(\mathbf{i}_f - \mathbf{i}_o)$ queda fuera de la medida y la tensión de la rama nunca se mide, se reconstruye. La red neuronal no recibe por lo tanto ninguna magnitud que el controlador no tenga disponible en el instante de inferir, y el conjunto de ajuste se construye desde las mismas columnas del registro.

La distinción importa al leer el término físico de la pérdida. Ese término está escrito sobre la tensión de rama, según la forma incremental de la ecuación (4.63), y por eso el conjunto de ajuste le entrega $\mathbf{v}_C + R_{fc}(\mathbf{i}_f - \mathbf{i}_o)$ y no $\mathbf{v}_C$. Alimentarlo con la tensión del condensador atribuiría la caída resistiva a una desviación de la inductancia, que es un sesgo de arrastre. Las dos realizaciones describen la misma física, según demuestra la ecuación (4.63), de modo que el residuo que la red neuronal penaliza y el que el predictor ejecuta son el mismo, expresado en variables distintas.

Normalización y sentido de los estadísticos. Las componentes de $\mathbf{z}_m$ recorren órdenes de magnitud muy distintos, desde unidades de amperio hasta decenas de miles de vatios, y una capa afín con pesos de magnitud comparable quedaría dominada por las de mayor escala. Por eso cada componente se estandariza según la ecuación (4.123) con la media y la desviación típica muestrales del conjunto de ajuste,

$$\mu_{z,j} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N z_{m,j}^{(n)}, \quad \sigma_{z,j} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N (z_{m,j}^{(n)} - \mu_{z,j})^2}, \quad (4.126)$$

de modo que σ_z es una desviación típica y no debe confundirse con ninguna función de activación. Tras la transformación, cada componente de $\mathbf{z}_n$ es adimensional y mide a cuántas desviaciones típicas del promedio del conjunto de ajuste se encuentra la medida actual. La Tabla 4.9 recoge los estadísticos de algunas componentes representativas, que además fijan la escala física del conjunto con que se ajustó cada red.

Tabla 4.9

ESTADÍSTICOS DE NORMALIZACIÓN DE COMPONENTES REPRESENTATIVAS, MODO CONECTADO A LA RED.

Índice	Magnitud	Escenario 1		Escenario 2	
		μ_z	σ_z	μ_z	σ_z
0	$i_{f,\alpha}$ [A]	0.02	81.27	-0.03	113.18
2	$v_{C,\alpha}$ [V]	0.01	154.55	0.01	154.66
24	P^{ref} [W]	13 385	10 938	15 163	9 978
25	Q^{ref} [var]	8 407	13 171	10 334	12 823

Un ejemplo aclara la lectura. Si en el Escenario 2 se mide $i_{f,\alpha} = 113.18$ A, la componente normalizada vale $z_{n,0} \simeq 1$, es decir la medida está una desviación típica por encima del promedio del conjunto de ajuste. Las medias de las magnitudes eléctricas son prácticamente nulas por ser señales alternas, mientras las de las consignas no lo son y codifican el punto de despacho medio de la campaña de datos. Esto último es la razón cuantitativa de la limitación que la Sección 5.8.1 mide, una consigna alejada de $\mu_z \pm 2\sigma_z$ sitúa a la red neuronal fuera de la región que observó durante el ajuste.

Tamaño de la red neuronal y recuento de parámetros. La ecuación (4.124) concreta la notación por capas de la Sección 3.5.1. Las dos capas ocultas emplean tanh y la capa de salida la identidad, porque esta última debe admitir ambos signos.

Tabla 4.10

DIMENSIONES Y RECuento DE PARÁMETROS ENTRENABLES DE CADA RED.

Capa	Conectado a la red	Parámetros	Isla	Parámetros
$\mathbf{W}_1, \mathbf{b}_1$	$32 \times 26, 32$	864	$32 \times 28, 32$	928
$\mathbf{W}_2, \mathbf{b}_2$	$32 \times 32, 32$	1 056	$32 \times 32, 32$	1 056
$\mathbf{W}_3, \mathbf{b}_3$	$3 \times 32, 3$	99	$3 \times 32, 3$	99
Total		2 019		2 083

La Tabla 4.10 da el tamaño exacto del modelo. La diferencia de 64 parámetros entre los dos modos son las dos entradas adicionales del modo isla multiplicadas por las 32 neuronas de la primera capa. Son cifras pequeñas con intención. Toda la información del conjunto de ajuste queda comprimida en unos dos mil números, y ese tamaño es el que hace viable evaluar la red neuronal dentro del periodo de control, según cuantifica la Sección 4.7.2.

4.6.4. De la salida de la PINN al parámetro efectivo

La capa de salida entrega tres valores que todavía viven en el espacio normalizado del entrenamiento,

$$\tilde{\boldsymbol{\eta}}(k) = \mathbf{W}_3 \mathbf{h}^{(2)}(k) + \mathbf{b}_3, \quad (4.127)$$

y se devuelven a su escala con los estadísticos de la salida, componente a componente,

$$\hat{\boldsymbol{\eta}}(k) = \tilde{\boldsymbol{\eta}}(k) \odot \boldsymbol{\sigma}_y + \boldsymbol{\mu}_y, \quad (4.128)$$

donde $\odot$ es el producto componente a componente. Para el Escenario 1 esos estadísticos valen $\boldsymbol{\mu}_y = [-0.5037, -0.5610, 0]$ y $\boldsymbol{\sigma}_y = [1.2816, 1.2608, 0]$, y para el Escenario 2 valen $\boldsymbol{\mu}_y = [-0.5380, -0.5882, 0]$ y $\boldsymbol{\sigma}_y = [1.2912, 1.2763, 0]$. En ambos casos son los mismos en los dos modos porque se calcularon una sola vez sobre el conjunto completo de la campaña de datos.

Como se justificó en la Sección 4.6.2, el conjunto de ajuste mantiene $K_{R_{fc}} = 1$. Por ello la tercera componente de $\boldsymbol{\mu}_y$ y $\boldsymbol{\sigma}_y$ es nula, la desnormalización impone $\rho_{R_{fc}} = 1$ y ese canal no modifica el predictor. La neurona se conserva solo para mantener la arquitectura y la interfaz de exportación.

La etiqueta que la red neuronal aprende no es el factor sino su logaritmo, $\eta = \ln K$, de modo que el factor se recupera con la exponencial,

$$\rho(k) = e^{\hat{\boldsymbol{\eta}}(k)}. \quad (4.129)$$

La elección tiene dos consecuencias que justifican por sí solas la escala logarítmica. La primera es que $\rho > 0$ por construcción, de modo que ninguna salida de la PINN puede

producir una inductancia o una capacitancia negativas, que romperían el predictor. La segunda es de simetría, porque duplicar y reducir a la mitad un parámetro son perturbaciones inversas y quedan a la misma distancia del origen, $\ln 2 = 0.693$ y $\ln(1/2) = -0.693$. Un error de estimación de una magnitud dada pesa entonces lo mismo por exceso que por defecto, que es la propiedad que la métrica $|\ln(\rho/K)|$ del Capítulo 5 explota. La salida se filtra después con el pasa-bajos de constante $\tau_\rho = 2$ ms y se acota en $[0.05, 5]$ antes de entrar al predictor, según la ecuación (4.121).

Cadena de corrección. Se distinguen cinco etapas entre la salida de la red y los coeficientes del predictor.

1. Salida logarítmica desnormalizada: $\hat{\eta}(k)$.
2. Factor instantáneo positivo: $\rho(k) = e^{\hat{\eta}(k)}$.
3. Factor filtrado $\bar{\rho}(k)$, con $\tau_\rho = 2$ ms, para L_f y C_f .
4. Factor saturado $\rho_{\text{sat}}(k)$ en $[0.05, 5]$, aplicado al predictor.
5. Coeficientes efectivos a_i^{eff} , b_i^{eff} y b_c^{eff} , obtenidos al reescalar L_f y C_f con el factor aplicado e incorporados al MPC.

Ejemplo numérico registrado. Se reproduce la cadena de la Figura 4.11 en $t = 1.5$ s de un ensayo del Escenario 2 conectado, con $K_{L_f} = 1.20$, $K_{C_f} = 1$, corrección permanente y la red desplegada. Los nominales son $L_f = 3$ mH, $C_f = 500$ μ F, $R_f = 0.012$ Ω y $T_s = 214.592$ μ s.

Medición y entrada. La corriente registrada en ejes $\alpha\beta$ es $\mathbf{i}_f = [-22.657, -50.277]$ A. Las veintiséis componentes siguen la Tabla 4.8. Por ejemplo, la primera se normaliza como $(-22.657187 + 0.029581)/113.175441 \simeq -0.199934$. El registro completo y sus estadísticos se conservan según el Apéndice A.4.

Inferencia. Las dos capas ocultas de 32 neuronas y la salida lineal producen $\hat{y}$. Para L_f y C_f , la desnormalización $\hat{\eta} = \mu_y + \sigma_y \odot \hat{y}$ y la exponencial $\rho = e^{\hat{\eta}}$ entregan

$$\begin{aligned}\mu_y &= [-0.537970, -0.588223], & \sigma_y &= [1.291215, 1.276349], \\ \hat{y} &= [0.523725, 0.474634], & \hat{\eta} &= [0.138272, 0.017576], \\ \rho &= [1.148288, 1.017731].\end{aligned}$$

Filtrado y aplicación. El filtro de 2 ms usa $\alpha_\rho = 0.903101$. Su estado anterior y la nueva salida son

$$\bar{\rho}(k-1) = [1.131760, 1.033232], \quad \bar{\rho}(k) = [1.133362, 1.031730].$$

La saturación en $[0.05, 5]$ no modifica estos valores, que se aplican al predictor. Así, $L_f^{\text{eff}} = 3.400085$ mH y $C_f^{\text{eff}} = 515.865$ μ F.

Coefficientes. La ecuación (4.24) da

$$\begin{array}{lll} \text{nominal} & a_i = 0.999142, & b_i = 0.071531, \quad b_c = 0.429185, \\ \text{corregido} & a_i^{eff} = 0.999243, & b_i^{eff} = 0.063114, \quad b_c^{eff} = 0.415985. \end{array}$$

Las ganancias b_i y b_c disminuyen 11.77 % y 3.08 %, mientras a_i cambia poco. La inducancia aplicada se acerca a la real de 3.6 mH, sin alcanzarla. El ejemplo muestra cómo la estimación modifica el predictor, no una identificación exacta. La reproducción de las 7456 muestras coincide con la salida instantánea y filtrada registrada, con diferencia máxima inferior a 3×10^{-14} .

Tercera salida. La campaña fija $K_{Rfc} = 1$ y los modelos desplegados exportan $\mu_{y,3} = \sigma_{y,3} = 0$. Por ello, la desnormalización devuelve cero cualquiera sea la salida de la red, y $\rho_{Rfc} = e^0 = 1$. No es una decisión en línea. El canal conserva la arquitectura de tres parámetros y admite una futura campaña con R_{fc} variable, aunque una versión de dos salidas bastaría para el comportamiento actual.

Qué ajusta el optimizador y qué no. El conjunto de parámetros que el entrenamiento modifica comprende los pesos y sesgos de la red neuronal y los dos escalares que equilibran los términos de datos y física,

$$\theta = \{\mathbf{W}_1, \mathbf{b}_1, \mathbf{W}_2, \mathbf{b}_2, \mathbf{W}_3, \mathbf{b}_3, s_d, s_p\},$$

es decir los 2019 o 2083 parámetros de la red neuronal indicados en la Tabla 4.10, más los dos escalares de balance. En cada época se evalúa la pérdida, se obtiene su gradiente $\mathbf{g} = \nabla_{\theta} \mathcal{L}$ por retropropagación y el optimizador actualiza θ en la dirección que la reduce. Conviene ser explícito sobre lo que *no* entra en ese conjunto. Los estadísticos μ_z , σ_z , μ_y y σ_y se calculan una vez sobre el conjunto de datos y permanecen fijos, de modo que no son parámetros aprendidos sino una descripción del conjunto de ajuste. Tampoco lo son L_f , C_f ni R_{fc} , que la red neuronal no representa internamente. Lo que la PINN aprende es una función que lleva mediciones a factores de escala, y son esos factores los que reconstruyen los parámetros efectivos.

4.6.5. Secuencia completa, del conjunto de datos al predictor

Reuniendo lo anterior, la implementación queda descrita por dos cadenas que no se solapan en el tiempo. La primera ocurre una sola vez y fuera de línea,

$$\begin{aligned} \text{simulación} &\rightarrow \text{conjunto etiquetado} \rightarrow \mathcal{L}(\theta) \rightarrow \nabla_{\theta} \mathcal{L} \\ &\rightarrow \theta^{ref} \rightarrow \text{modelo ajustado} \rightarrow \text{cabecera de constantes}, \end{aligned} \tag{4.130}$$

donde la rutina de exportación escribe μ_z , σ_z , μ_y , σ_y y los seis arreglos de pesos y sesgos como constantes de un fichero de cabecera en C, que el bloque de control incorpora en tiempo de compilación. La segunda ocurre en cada periodo de control,

$$\begin{aligned}
z_m &\rightarrow z_n \rightarrow \tanh(\mathbf{W}_1 \cdot + \mathbf{b}_1) \rightarrow \tanh(\mathbf{W}_2 \cdot + \mathbf{b}_2) \rightarrow \tilde{\boldsymbol{\eta}} \\
&\rightarrow \hat{\boldsymbol{\eta}} \rightarrow \boldsymbol{\rho} \rightarrow \{L_f^{eff}, C_f^{eff}, R_{fc}\} \rightarrow \{a_i^{eff}, b_i^{eff}, b_c^{eff}, R_{fc}\}.
\end{aligned} \tag{4.131}$$

En línea no hay entrenamiento de ninguna clase. Los pesos son constantes de solo lectura y el bloque de control ejecuta únicamente normalizaciones, tres productos matriz por vector, la tangente hiperbólica, una desnormalización, una exponencial, un filtro de primer orden y un recorte.

La cadena de la ecuación (4.131) termina en los coeficientes del predictor, y ahí termina también el alcance de la corrección. La PINN no entrega estados de conmutación ni índices de modulación, no participa en la función de costo y no interviene en la selección de la acción. El MPC conserva íntegras sus referencias, su función de costo, sus restricciones y su regla de decisión, y lo único que cambia respecto del control base es que predice con parámetros efectivos en lugar de nominales. Esa frontera hace auditable el esquema, porque cada comparación del Capítulo 5 mantiene la misma estructura de control y cambia únicamente los parámetros que alimentan el predictor.

4.6.6. Función de pérdida y configuración de entrenamiento

La pérdida total reúne un término de datos, uno físico y uno de regularización. Su expresión general se presenta antes de desglosar cada componente,

$$\begin{aligned}
\mathcal{L} &= \lambda_d \mathcal{L}_{\text{data}} + \lambda_p \mathcal{L}_{\text{phys}} + \frac{1}{2}(s_d + s_p) + \lambda_r \mathcal{L}_{\text{reg}}, \\
\lambda_d &= \frac{1}{2}e^{-s_d}, \quad \lambda_p = \frac{1}{2}e^{-s_p}.
\end{aligned} \tag{4.132}$$

Los pesos λ_d y λ_p no son hiperparámetros fijos. Los escalares s_d y s_p se ajustan junto con la red neuronal, mientras $\lambda_r = 10^{-5}$ permanece fijo. Esta es una lbPINN, del inglés *loss-balanced Physics-Informed Neural Network* [50], cuyo balance por incertidumbre sigue la interpretación de máxima verosimilitud del aprendizaje multitarea [51]. No corresponde llamarla *Inverse Bayesian PINN*, pues no calcula una distribución posterior de los pesos ni de los parámetros físicos.

La literatura advierte que una ponderación fija puede alterar la convergencia y hacer que un residuo domine al otro cuando sus escalas o gradientes difieren [32, 50, 52]. El reparto aprendible evita fijar esa relación a mano. En lo que sigue, $\mathcal{L}_{\text{data}}$ mide el ajuste a la etiqueta, $\mathcal{L}_{\text{phys}}$ la coherencia con las transiciones y $\mathcal{L}_{\text{reg}}$ la magnitud de los parámetros de la red. El superíndice *meas* marca las magnitudes medidas en la planta y cumple el mismo papel que *med* en el resto del capítulo.

El de datos compara la salida normalizada de la PINN con la etiqueta logarítmica normalizada,

$$\mathcal{L}_{\text{data}} = \frac{1}{3 \sum_{n=1}^N w_n} \sum_{n=1}^N w_n \|\tilde{\boldsymbol{\eta}}_n - \tilde{\boldsymbol{\eta}}_{\text{true},n}\|_2^2. \tag{4.133}$$

El factor 3 promedia las salidas. Los w_n ponderan de forma fija muestras nominales y perturbadas, a diferencia de los pesos aprendidos λ_d y λ_p . Con pesos iguales resulta el MSE sobre muestras y componentes. La implementación en MATLAB sigue una secuencia común a los dos escenarios.

1. **Construcción del conjunto de datos.** Se forma el vector de entrada con las mediciones disponibles, incluida $\mathbf{v}_C$ sin reconstruir.
2. **Reconstrucción física auxiliar.** Se calcula $\mathbf{d} = \mathbf{i}_f - \mathbf{i}_o$, se reconstruye $\mathbf{v}_c = \mathbf{v}_C + R_{fc}\mathbf{d}$ en los arreglos auxiliares y se selecciona la tensión aplicada. El Escenario 1 usa el vector del periodo anterior y el Escenario 2 usa el promedio de los dos mandos más recientes.
3. **Entrenamiento paramétrico.** Se normalizan entradas y etiquetas, se ejecuta la red neuronal y se entregan sus tres salidas al cálculo de la pérdida.
4. **Evaluación del residuo físico.** Se desnormalizan los factores, se reconstruyen L_f^{eff} y C_f^{eff} y se evalúan las ecuaciones (4.120) y (4.119).
5. **Balance y exportación.** Se combinan los términos supervisado, físico y de regularización. La rutina de exportación conserva únicamente las constantes necesarias para la inferencia en C.

El término físico evalúa la coherencia de los parámetros inferidos con las transiciones medidas. La corriente se compara sobre $\mathbf{i}_f$ y la tensión sobre la coordenada auxiliar de rama $\mathbf{v}_c$,

$$\mathcal{L}_{\text{phys}} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left[\frac{\|\mathbf{i}_{f,n}^{\text{meas}} - \hat{\mathbf{i}}_{f,n}\|_2^2}{i_{\text{esc}}^2} + \frac{\|\mathbf{v}_{c,n}^{\text{meas}} - \hat{\mathbf{v}}_{c,n}\|_2^2}{v_{\text{esc}}^2} \right]. \quad (4.134)$$

Esta elección no cambia la variable física que se identifica. Como R_{fc} permanece nominal, el residuo de rama es algebraicamente idéntico al del condensador,

$$\mathbf{v}_c^{\text{meas}}(k) - \hat{\mathbf{v}}_c(k) = \mathbf{v}_C^{\text{meas}}(k) - \left[\mathbf{v}_C^{\text{meas}}(k-1) + b_c^{eff} \mathbf{d}(k-1) \right]. \quad (4.135)$$

La reconstrucción evita que la caída $R_{fc}\mathbf{d}$ sea atribuida a L_f , mientras la cancelación de la ecuación (4.135) conserva la relación constitutiva del condensador.

Las magnitudes i_{esc} y v_{esc} son *escalas de normalización*, no desviaciones estándar, y su definición debe explicitarse porque condiciona por completo la lectura de los pesos. Se calculan una sola vez sobre el conjunto de entrenamiento completo como el valor absoluto máximo de cada señal en coordenadas $\alpha\beta$, más una unidad para evitar una división por cero en el caso degenerado,

$$i_{\text{esc}} = \max_n |i_{f,n}^{\alpha\beta}| + 1, \quad v_{\text{esc}} = \max_n |v_{c,n}^{\alpha\beta}| + 1. \quad (4.136)$$

Son máximos instantáneos y no valores eficaces, de modo que quedan fijados por el escenario más extremo de la campaña y no por un punto de operación representativo. La Tabla 4.11 reúne los cuatro pares desplegados.

Tabla 4.11

ESCALAS FÍSICAS DE LA PÉRDIDA DE FÍSICA EN LAS CUATRO REDES DESPLEGADAS.

Escenario	Modo	i_{esc} [A]	v_{esc} [V]
Escenario 1	Conectado a la red	718.6	289.7
Escenario 1	Isla	590.8	549.5
Escenario 2	Conectado a la red	1061.1	274.1
Escenario 2	Isla	573.6	589.8

La asimetría entre modos tiene una lectura física directa y **sigue el mismo patrón en los dos escenarios**. En modo conectado a la red la magnitud extrema es la corriente, porque el convertidor inyecta contra una fuente rígida que sostiene la tensión del condensador cerca de su valor nominal. En modo isla la magnitud extrema es la tensión, porque el maestro es quien la forma y el barrido incluye condiciones de identificación degradada en que la referencia no se sigue, mientras la corriente queda acotada por la carga conectada. El cociente entre modos es de aproximadamente 1.9 en tensión en el Escenario 1 y de 2.2 en el Escenario 2. La corriente extrema del Escenario 2 es la mayor de las cuatro porque la modulación reparte cada periodo entre dos actualizaciones y el *ripple* de conmutación se suma al valor de despacho.

La regularización L_2 limita el crecimiento de los pesos y sesgos de la red neuronal,

$$\mathcal{L}_{\text{reg}} = \sum_{\ell=1}^3 \left(\|\mathbf{W}_{\ell}\|_F^2 + \|\mathbf{b}_{\ell}\|_2^2 \right). \quad (4.137)$$

Reparto de la pérdida por verosimilitud. A cada objetivo $i \in \{d, p\}$ se le asocia una varianza σ_i^2 y se parametriza $s_i = \ln \sigma_i^2$, lo que elimina la restricción de signo. La ecuación (4.132) es entonces la forma expandida de $\sum_i [e^{-s_i} \mathcal{L}_i/2 + s_i/2] + \lambda_r \mathcal{L}_{\text{reg}}$, con $\mathcal{L}_d = \mathcal{L}_{\text{data}}$ y $\mathcal{L}_p = \mathcal{L}_{\text{phys}}$. El sumando $s_i/2$ impide la solución trivial, porque sin él al optimizador le bastaría llevar s_i a infinito para anular el peso y con él la propia pérdida. La ponderación relativa elegida en cada iteración se recupera como $\lambda_p^{\text{ef}} = e^{-s_p}/e^{-s_d}$. Los modelos utilizados en las campañas conservan los pesos de la red neuronal, la época y el error de validación del mejor punto, pero el punto de control no guarda los valores de s_d y s_p asociados a esa época ni registra su trayectoria. Por ello no se atribuye ningún resultado a un valor final específico de λ_p^{ef} . Esta omisión no modifica la inferencia en línea, donde la función de pérdida no se evalúa, aunque impide reproducir exactamente el reparto alcanzado durante el entrenamiento. Un entrenamiento posterior debe incorporar ambos escalares al mejor punto de control y al registro de convergencia. Las veinte redes de la Sección 5.9 ya los conservan, y su registro muestra cuánto se aleja la ponderación del reparto inicial.

El acoplamiento entre cada residuo y su peso exige dos salvaguardas numéricas. El peso que minimiza la ecuación (4.132) respecto de s_i vale $1/(2\mathcal{L}_i)$, de manera que a medida que un término descende su propio peso crece. En los ensayos, usar para s_i la misma tasa de aprendizaje que para la red neuronal produjo una evolución oscilatoria y pérdida de convergencia. La primera salvaguarda es una tasa propia para los dos escalares, cincuenta veces menor que la de la red neuronal. La segunda es un acotamiento $|s_i| \leq 10$, que limita el peso a $e^{\pm 10}/2$ e impide que un término se apague o domine por completo. Con ambas, el ajuste es estable en los dos modos y en los tres escenarios.

La regularización conserva su peso fijo λ_r porque no compite con los otros dos, no mide un objetivo del problema sino que limita la norma de la solución, y un estudio de sensibilidad sobre cuatro órdenes de magnitud la muestra indiferente dentro del piso de ruido del entrenamiento. El Apéndice A.7.2 recoge ese estudio y su lectura.

De ese mismo estudio se sigue una consecuencia metodológica que conviene retener, porque acota cualquier comparación futura entre configuraciones de ajuste. La dispersión del error de validación entre entrenamientos idénticos salvo por la inicialización llega a ser mayor que casi cualquier efecto atribuible a los pesos. **Toda comparación entre variantes de entrenamiento debe promediar sobre varias inicializaciones o carecerá**

de significado, y esa es una razón adicional para no fijar los pesos a mano.

Adam actualiza la red y los dos escalares únicamente durante el entrenamiento *offline* [53]. El término L_2 conserva $\lambda_r = 10^{-5}$ y limita la norma de la solución, pero no representa una restricción física. La información del modelo entra por $\mathcal{L}_{\text{phys}}$ con el peso aprendido en la ecuación (4.132).

La arquitectura, los hiperparámetros y los criterios de parada se reúnen en la Tabla A.6 del Apéndice A. Allí se distingue la arquitectura de tres salidas del espacio de perturbación y evaluación, que es el plano (K_{Lf}, K_{Cf}) con $K_{Rfc} = 1$. Los tres canales llegan a la desnormalización, pero el tercero produce siempre $\rho_{Rfc} = 1$ por sus estadísticos exportados. Las métricas de entrenamiento y validación se reportan en el Capítulo 5 porque constituyen resultados y no decisiones metodológicas.

4.6.7. Campaña de datos y envoltorio de validez

Se llama *envoltorio de validez* a la región del espacio de perturbación dentro de la cual la identificación conserva sentido. Es la intersección de dos cosas distintas, el *dominio de ajuste*, o rango de factores que la campaña recorre y fuera del cual la red neuronal extrapola sin dato que la respalde, y una condición física, porque aunque la PINN identifique bien el desajuste el convertidor puede no disponer de tensión para actuar. El Capítulo 5 la emplea para separar los niveles donde la corrección puede aportar de aquellos donde el límite ya no es el modelo.

La campaña recorre factores del filtro en la banda $[0.05, 5]$ e incluye casos nominales, variaciones individuales, combinaciones acopladas, extremos y relleno. El **Escenario 1 emplea 500 escenarios por modo, 450 de ajuste y 50 reservados para validación fuera del entrenamiento**. El **Escenario 2 emplea 600, 550 de ajuste y los mismos 50 reservados**, porque a esa misma base añade 100 casos de variación del punto de operación, con la carga escalada de forma logarítmica en $[0.70, 1.40]$ respecto de la nominal y las consignas recalculadas en consecuencia. Ese bloque adicional entrega holgura frente a cambios de corriente sin convertir la carga en una salida de la PINN, y responde a que el esquema modulado retira parte del *ripple* del que la identificación se alimenta, de modo que conviene ampliarle la diversidad de puntos de despacho.

La separación por escenario evita que muestras de una misma trayectoria aparezcan simultáneamente en entrenamiento y validación. Los estadísticos de normalización se calculan solo con el subconjunto de entrenamiento y se exportan junto con los pesos.

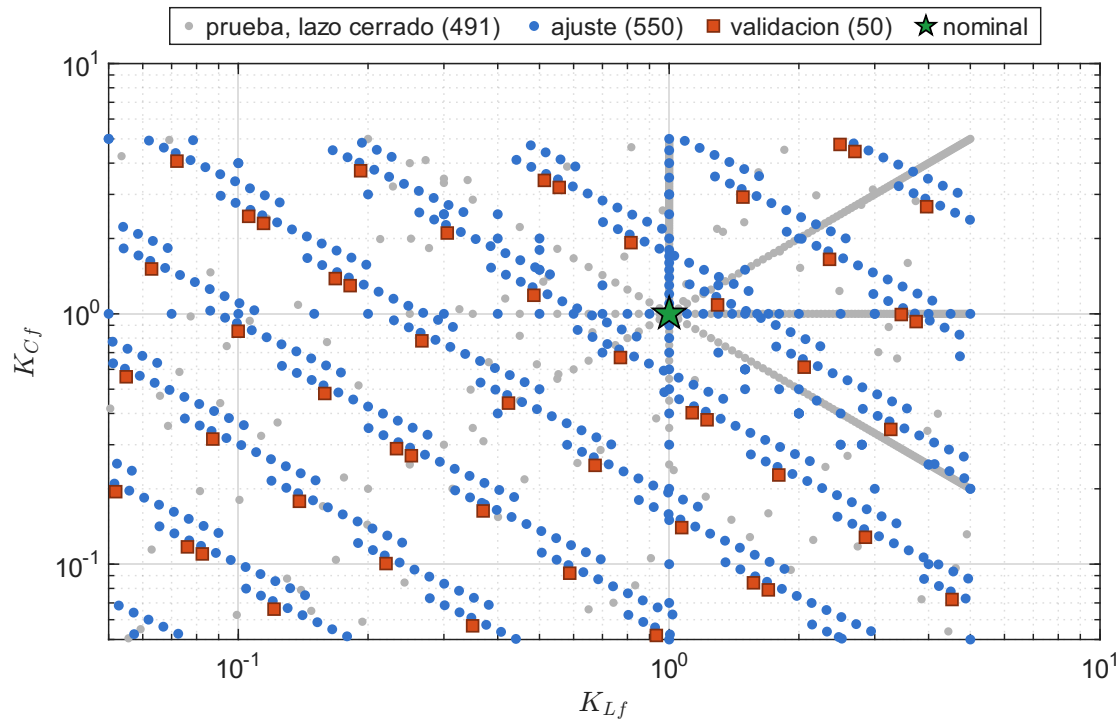


Figura 4.9. Reparto de los conjuntos en el plano de los dos factores del filtro.

La Figura 4.9 distingue independencia temporal y novedad paramétrica. La partición por escenario impide compartir muestras de una corrida entre ajuste y validación. De los 491 puntos de prueba, 426 presentan pares (K_{Lf}, K_{Cf}) ausentes en los 550 registros de ajuste y 65 los comparten, incluidos el nominal y puntos axiales y diagonales. El ajuste recorre radios y la prueba los grupos G1–G5. Se evalúan nuevas trayectorias y consignas, y mayoritariamente nuevos pares paramétricos, no geometrías totalmente disjuntas. La banda declarada es una envolvente de identificación. No garantiza que el convertidor disponga de margen físico suficiente en todos sus extremos.

La segunda condición es física y se resuelve en el capítulo de resultados. La banda declarada acota lo que la red neuronal puede identificar, no lo que el convertidor puede corregir. La PINN es capaz de reconocer con exactitud un filtro que, precisamente por estar bien identificado, exija una tensión superior a la que el puente sintetiza, y en ese punto el límite deja de ser el modelo y pasa a ser la actuación. Esa condición depende del límite de tensión de cada esquema, de la impedancia de línea, del reparto entre unidades y, en el esquema modulado, del amortiguamiento activo, de modo que su desarrollo pertenece al capítulo donde esos elementos ya están medidos. La Sección 5.1.4 la construye en forma cerrada, la Sección 5.1.5 evalúa el límite de tensión de las dos actuaciones y contrasta el nivel crítico predicho contra el observado en las campañas. Aquí basta retener que la envolvente de validez es la intersección de las dos condiciones, y que la de identificación por sí sola no garantiza margen de actuación en sus extremos.

Diseño del conjunto de perturbación. Reducido el espacio a dos parámetros, el conjunto de escenarios admite un diseño geométrico explícito. Se adopta el plano $(\ln K_{Lf}, \ln K_{Cf})$, y la

métrica logarítmica tiene tres consecuencias que el Capítulo 5 usa. El nominal es el origen. Un factor y su recíproco quedan a igual distancia en sentidos opuestos, porque $\ln(1/K) = -\ln K$, de modo que sobreestimar al doble y subestimar a la mitad son perturbaciones simétricas y no una nueve veces mayor que la otra. Y una perturbación multiplicativa se convierte en un desplazamiento, lo que permite tratar los grupos como direcciones, cada uno una recta por el origen recorrida en dos sentidos. Los niveles se generan sobre rejilla logarítmica, 41 por variante, para que la resolución sea uniforme en términos relativos. La Tabla 4.12 recoge las cuatro direcciones adoptadas.

Tabla 4.12

DISEÑO DEL CONJUNTO DE PERTURBACIÓN EN EL PLANO ($\ln K_{Lf}$, $\ln K_{Cf}$). CADA GRUPO ES UNA RECTA POR EL ORIGEN RECORRIDA EN DOS SENTIDOS.

Grupo	Directa	Inversa	Recta	Ángulo	Efecto sobre el filtro
G1	$[K, 1]$	$[1/K, 1]$	$y = 0$	0°	Perturbación axial de L_f . Desplaza la resonancia y Z_0 de forma simultánea.
G2	$[K, K]$	$[1/K, 1/K]$	$y = x$	45°	El producto $L_f C_f$ escala con K^2 y la resonancia se desplaza, mientras $Z_0 = \sqrt{L_f/C_f}$ se conserva.
G3	$[1, K]$	$[1, 1/K]$	$x = 0$	90°	Perturbación axial de C_f .
G4	$[K, 1/K]$	$[1/K, K]$	$y = -x$	135°	El producto $L_f C_f$ se conserva y la resonancia no se desplaza, mientras Z_0 escala con K . Filtro globalmente más pesado o más liviano.
G5	muestreo latino hipercúbico, independiente en cada eje				Variación simultánea y no correlacionada de ambos componentes.

El vector de la Tabla 4.12 determina por completo cómo se desplazan los tres descriptores dinámicos del filtro, la frecuencia de resonancia $\omega_{res} = 1/\sqrt{L_f C_f}$, la impedancia característica $Z_0 = \sqrt{L_f/C_f}$ y el amortiguamiento efectivo $\zeta = R_v/(2Z_0)$ que resulta de mantener R_v constante en su valor nominal. La Tabla 4.13 los reúne para la variante directa. La inversa se obtiene sustituyendo K por $1/K$. Hay que tenerla presente al leer el Capítulo 5, porque explica por qué grupos que parecen igual de severos en magnitud de perturbación no lo son en absoluto en términos dinámicos.

Tabla 4.13

EFEECTO DE CADA DIRECCIÓN SOBRE LOS DESCRIPTORES DINÁMICOS DEL FILTRO, PARA LA VARIANTE DIRECTA Y RELATIVO AL CASO NOMINAL. EL AMORTIGUAMIENTO SUPONE R_v CONSTANTE EN EL VALOR DIMENSIONADO PARA EL FILTRO NOMINAL.

Grupo	Vector $[K_{Lf}, K_{Cf}]$	$\omega_{res}/\omega_{res,nom}$	$Z_0/Z_{0,nom}$	ζ/ζ_{nom}
G1	$[K, 1]$	$1/\sqrt{K}$	$\sqrt{K}$	$1/\sqrt{K}$
G2	$[K, K]$	$1/K$	1	1
G3	$[1, K]$	$1/\sqrt{K}$	$1/\sqrt{K}$	$\sqrt{K}$
G4	$[K, 1/K]$	1	K	$1/K$

Dos lecturas de esta tabla se usan más adelante. La primera es que G2 es la única dirección donde el amortiguamiento efectivo no se desintoniza, porque conserva Z_0 por construcción. La segunda es que G4 es la dirección donde más se desintonía, con ζ inver-

samente proporcional a K , de modo que sobre el rango $K \in [0.2, 5]$ el amortiguamiento recorre un factor 25 pese a que la resonancia permanece exactamente fija. Es la mayor asimetría del diseño y se retoma al interpretar el comportamiento de G4 en el Escenario 2.

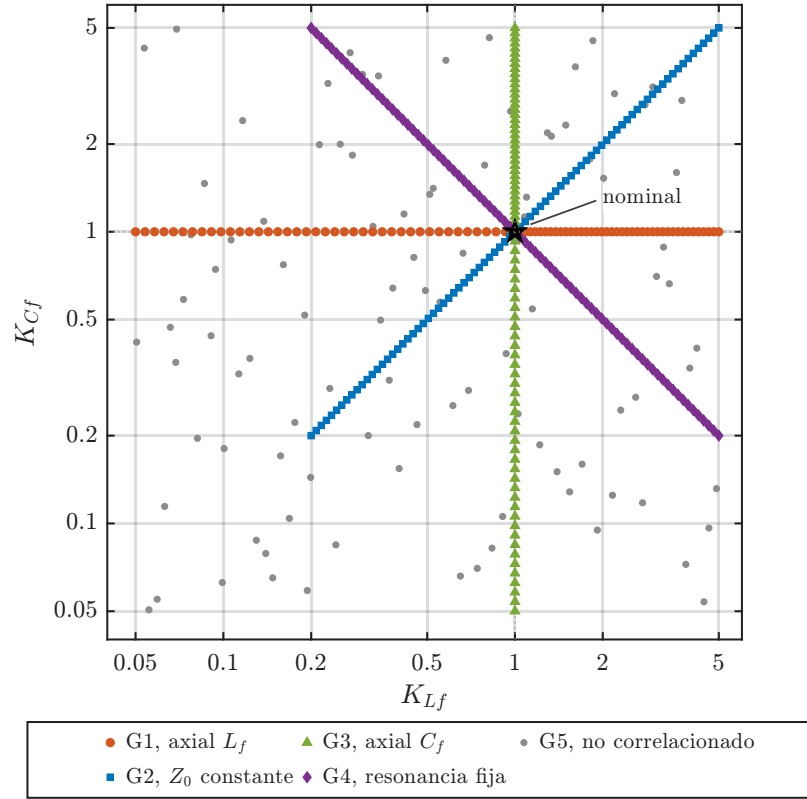


Figura 4.10. Conjunto de perturbación en el plano $(\ln K_{Lf}, \ln K_{Cf})$.

Alcance del rango. La Figura 4.10 hace visible el argumento geométrico. Cuatro rectas equiespaciadas muestrean el intervalo de direcciones de modo que ninguna dista más de 22.5° de alguna de ellas, y retirar cualquiera dejaría un sector de 90° sin representante próximo. Los axiales G1 y G3 recorren las dos décadas completas, $K \in [0.05, 5]$, mientras los acoplados G2 y G4 aplican factores recíprocos y su límite inferior es 0.2. G5 muestrea el plano con hipercubo latino de 100 puntos independientes en cada eje.

Conviene retener qué representa cada grupo. G1, G3 y G5 son trayectorias realistas, mientras G2 y G4 *no* son trayectorias de envejecimiento sino sondas que aíslan los dos efectos dinámicos separables del filtro, de modo que su valor es diagnóstico y no predictivo. Tampoco la banda $K \in [0.05, 5]$ describe un envejecimiento esperable, sino que la excede entre uno y dos órdenes de magnitud de forma voluntaria, porque el objetivo no es reproducir una degradación sino *caracterizar la envolvente de identificación*. El conjunto es en consecuencia un **ensayo de esfuerzo**, con la mayor densidad de puntos cerca del nominal por efecto de la rejilla logarítmica. El Apéndice A.8 desglosa las bandas realistas de cada componente y la justificación completa del rango adoptado, y el Apéndice A.6 recoge el conjunto preliminar de tres ejes al que este sustituye.

4.7. Implementación del param-scaling en el controlador maestro

La Tabla A.7 del Apéndice A vincula las etapas de la cadena fuera de línea de la ecuación (4.130) con los archivos MATLAB vigentes, de modo que la generación de datos, el entrenamiento, la validación y la exportación pueden regenerarse sin modificar la lógica central del controlador.

4.7.1. Integración en línea en el C-Script

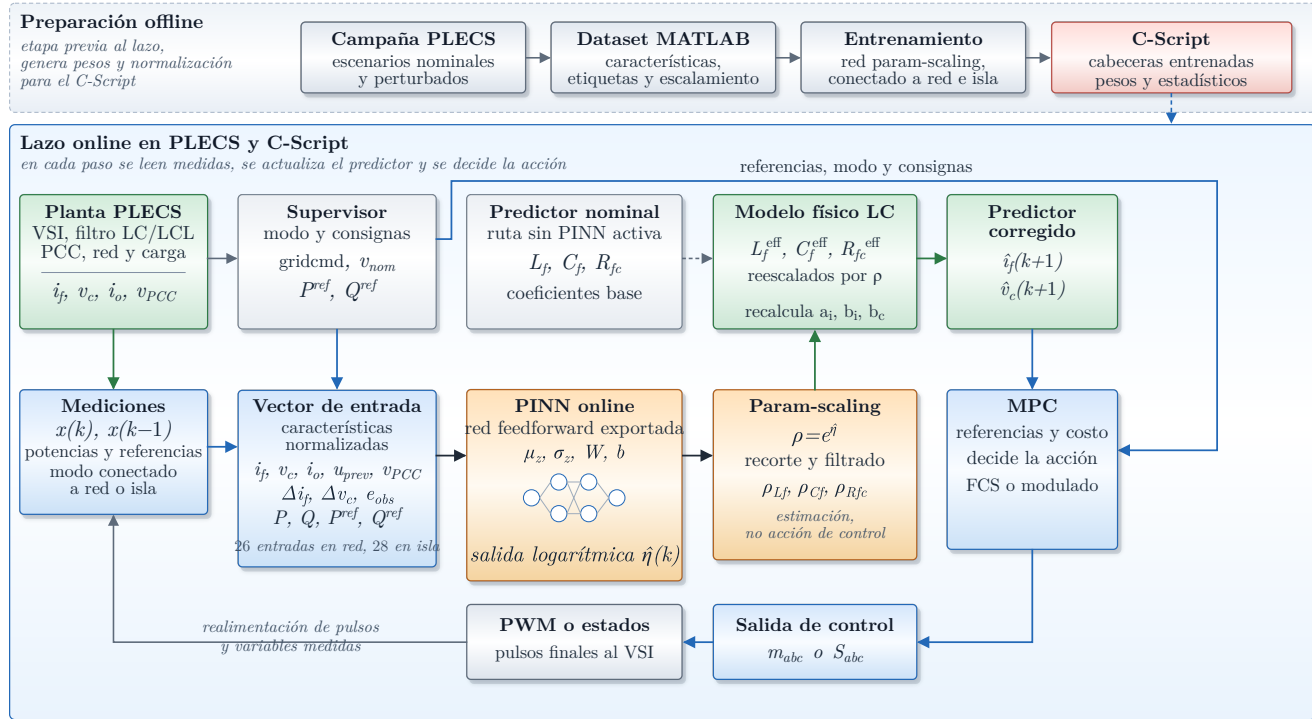
El maestro utiliza 27 puertos externos del C-Script, no 27 características de la PINN. El vector interno contiene 26 componentes en red y 28 en isla, según la construcción de la Sección 4.6. Una señal externa permite habilitar o inhibir la inferencia sin recompilar el controlador. Para separar la formulación de los nombres internos de PLECS, la condición se expresa mediante dos variables binarias, c_{disp} indica que los pesos y la rutina están disponibles, y $c_{hab}(k)$ representa la orden externa,

$$\chi_{PINN}(k) = \begin{cases} 1, & c_{disp} = 1 \wedge c_{hab}(k) = 1, \\ 0, & \text{en otro caso.} \end{cases} \quad (4.138)$$

Con la inferencia deshabilitada, el predictor utiliza los parámetros nominales. Al habilitarla, el C-Script selecciona la PINN según el modo, normaliza el vector de entrada, ejecuta la inferencia, aplica la exponencial, limita los factores y actualiza los coeficientes efectivos. El estado previo de mediciones y tensión aplicada se mantiene en variables persistentes. Los esclavos no ejecutan una PINN y sus parámetros permanecen nominales.

Integración de la inferencia PINN con el predictor del MPC

La red estima factores paramétricos, el predictor se actualiza y el MPC conserva la decisión de control



Lectura, la PINN estima ρ y actualiza los parámetros efectivos del predictor, mientras el MPC conserva la autoridad sobre los pulsos.

Figura 4.11. Integración de la inferencia PINN con el predictor del MPC.

La Figura 4.11 muestra la frontera funcional de la propuesta. La PINN entrega factores paramétricos al modelo discreto. El MPC conserva referencias, restricciones y decisión de control. La acción aplicada y las mediciones regresan al vector de entrada de la muestra siguiente.

La validación de la PINN se incorpora al criterio común de la Sección 4.8, primero se evalúan escenarios completos no utilizados en el entrenamiento y luego se repite cada caso en lazo cerrado con la PINN desactivada y activada, manteniendo iguales planta, referencias, perturbaciones y ventanas. Esta comparación pareada evita duplicar protocolos y permite atribuir la diferencia observada al ajuste del predictor.

4.7.2. Persistencia y presupuesto computacional

La inferencia utiliza arreglos de tamaño fijo y memoria estática compatible con el C-Script. No se realiza asignación dinámica durante la simulación. Para una red con n_{in} entradas, dos capas de 32 neuronas y tres salidas, el número dominante de multiplicaciones por muestra es

$$N_{mult} \approx 32n_{in} + 32^2 + 3 \cdot 32. \quad (4.139)$$

La evaluación temporal debe realizarse sobre la plataforma objetivo y contrastarse con T_s . En la plataforma de simulación el propio C-Script mide ese costo, y la actualización completa del maestro ocupa entre el 5 y el 6 % de T_s en el caso nominal, con la inferencia algo más de la mitad de ese tiempo, según la Tabla A.15 del Apéndice A.11. Sustituyendo

las dimensiones de entrada de cada modo, 26 en conexión a red y 28 en isla, la Tabla 4.14 resume el presupuesto de operaciones de las dos redes.

Tabla 4.14
PRESUPUESTO POR INFERENCIA DE LAS DOS REDES DEL MAESTRO.

Modo	n_{in}	N_{mult}	Parámetros
Conectado a red	26	1 952	2 019
Isla	28	2 016	2 083

Las dos redes quedan por debajo de las dos mil cien multiplicaciones por muestra. Este recuento no mide la latencia de las funciones no lineales ni demuestra cumplimiento temporal del C-Script. El Apéndice A.11 mide en un computador identificado la normalización, las capas, la desnormalización, la exponencial y la saturación. Verificar el plazo del controlador exige añadir adquisición, construcción de características y MPC en la plataforma de destino.

4.8. Criterios de validación y alcance de la implementación

La plataforma queda con dos escenarios. El Escenario 1 integra la validación del maestro, la operación dual y el reparto maestro-esclavo, y el Escenario 2 conserva esa arquitectura y añade MPC modulado, PWM simétrico, amortiguamiento activo, filtro *washout* y seguimiento de la corriente de salida. La validación de ambos comparte una base común,

1. **caso nominal**, sin perturbación y con la PINN desactivada, el controlador debe reproducir su referencia de diseño,
2. **preservación nominal**, activar la PINN en la planta nominal no debe degradar las métricas,
3. **identificación**, los factores estimados deben seguir la dirección y magnitud de la perturbación dentro de la banda entrenada,
4. **beneficio en lazo cerrado**, la mejora debe evaluarse mediante corridas pareadas sin y con PINN y ventanas idénticas,
5. **consistencia física**, corrientes, tensiones, saturación y potencia deben permanecer dentro de límites interpretables,
6. **conmutación**, la frecuencia efectiva debe calcularse desde los bordes de las compuertas finales,
7. **reproducibilidad**, cada resultado debe conservar parámetros, versión de pesos, archivos de salida y configuración del modelo.

La comparación entre escenarios exige además una precaución. En conjunto finito la salida del C-Script son estados discretos y en modulado son índices que el PWM externo convierte en pulsos, de modo que la frecuencia de actualización del controlador no basta para compararlos. El criterio adoptado iguala la conmutación efectiva, según se detalla en la Sección 4.5.1, y bajo él se ejecutaron todas las campañas.

Sobre el alcance, en los Escenarios 1 y 2 la PINN se ejecuta en el maestro y corrige L_f y C_f dentro de su predictor. El Escenario 3 extiende la identificación a cada convertidor, según la evaluación distribuida del Capítulo 5. La red no modifica referencias, pesos del costo ni límites eléctricos, y no compensa por sí sola una saturación sostenida ni garantiza validez fuera del dominio evaluado. Las variaciones paramétricas dentro de ese dominio son el objeto de la identificación. Un cambio de topología, periodo de muestreo o régimen fuera del dominio exige revalidar y, cuando corresponda, regenerar los datos y reentrenar. Quedan fuera el ajuste en línea de los pesos del MPC, la conformación automática de referencias, el control de un bus de continua no ideal y la validación experimental.

Capítulo 5

Resultados

Este capítulo evalúa el módulo PINN de ajuste paramétrico como capa correctiva del predictor del maestro en los dos escenarios de control, sobre la planta y la carga de estudio que fija el Capítulo 4. Dos hechos gobiernan lo que sigue. En modo conectado a la red el maestro sigue corriente y en modo isla forma tensión, por lo que la corrección paramétrica actúa sobre dinámicas distintas. Además, la identificación no puede superar el límite de tensión disponible ni las regiones numéricamente frágiles del predictor. La campaña cuantifica dónde aparece cada frontera.

Verificación del caso nominal. Antes de comparar la corrección paramétrica, se comprobó el balance activo y reactivo del Escenario 1 mediante la relación nodal de la ecuación (4.83). La Tabla 5.1 utiliza ventanas estacionarias equivalentes en ambos modos.

Tabla 5.1
BALANCE DE POTENCIA DEL ESCENARIO 1 EN EL CASO NOMINAL.

Variable	Conectado a red	Isla
P_{load} [W]	35 006.7	34 686.6
P_{PCC} (maestro) [W]	16 930.3	17 915.0
$P_{o,1}$ [W]	8 460.6	8 385.8
$P_{o,2}$ [W]	8 602.7	8 385.8
P_{grid} [W]	1 016.0	0.0
$\sum P$ [W]	35 009.6	34 686.6
Error activo [W]	−2.9	0.0
Q_{load} [VAr]	35 234.7	34 904.1
Q_{PCC} (maestro) [VAr]	19 223.2	15 731.4
$Q_{o,1}$ [VAr]	9 657.1	9 586.3
$Q_{o,2}$ [VAr]	9 766.6	9 586.3
Q_{grid} [VAr]	−3 412.0	0.0
$\sum Q$ [VAr]	35 234.8	34 904.1
Error reactivo [VAr]	−0.1	0.0

El error de balance activo permanece bajo 3 W frente a una carga cercana a 35 kW, y el reactivo es inferior a 1 VAr. En conexión a red, el maestro y los esclavos cubren aproximadamente sus cuotas de un medio y un cuarto, mientras la red absorbe el residuo. En isla, los esclavos entregan aportes simétricos y el maestro regula tensión como unidad *grid-forming*, por esta razón su potencia no queda impuesta como una consigna rígida.

5.1. Referencias analíticas de estabilidad y límite de actuación ante desajuste del modelo

El control predictivo, con o sin la PINN, calcula su acción a partir de un modelo interno del filtro. Cuando la planta real se aparta de ese modelo, los polos del lazo base pueden salir del círculo unitario. La corrección paramétrica puede desplazar esa frontera si estima el desajuste con suficiente precisión, pero no elimina las restricciones de estabilidad ni la saturación del actuador. A continuación se obtiene una referencia analítica a partir de K_{Lf} y K_{Cf} , los factores con mayor incidencia dinámica. El desarrollo adopta una representación reducida de acción continua, directamente vinculada con el Escenario 2. El predictor discreto comparte la planta y el horizonte de corriente con el conjunto finito del Escenario 1, pero este último selecciona estados mediante una función de costo y no implementa el lazo proporcional de tensión K_v de la reducción. Por ello, las cotas se validan directamente contra el esquema modulado y se usan solo como referencia interpretativa al contrastarlas con el FCS-MPC. El término resistivo de la rama capacitiva se conserva para representar pérdidas, pero no se estudia como un eje de degradación independiente. Cada cota inferior se contrasta aquí mismo contra los barridos axiales de la campaña, de manera que el desarrollo analítico no quede sin verificación y el lector sepa de antemano cuánto de lo que la cota anuncia se observa después en las Secciones 5.5 y 5.6.

5.1.1. Planta y control en tiempo discreto

El modelo discreto del filtro LC y los coeficientes nominales a_i , b_i y b_c son los de la ecuación (4.24) del Capítulo 4 y no se vuelven a derivar. Lo que esta sección necesita y aquel capítulo no da es la *planta perturbada*, es decir el mismo modelo con los factores aplicados. Escribiendo $L_f^r = K_{Lf}L_f$, $C_f^r = K_{Cf}C_f$ y $R_{fc}^r = K_{Rfc}R_{fc}$, y con $i_{cap} = i_f - i_o$,

$$i_f(k+1) = a_i^r i_f(k) + b_i^r (u(k) - v_c(k)), \quad (5.1)$$

$$v_c(k+1) = v_c(k) + b_c^r i_{cap}(k) + R_{fc}^r (i_{cap}(k+1) - i_{cap}(k)), \quad (5.2)$$

con los coeficientes reales

$$a_i^r = 1 - \frac{R_f T_s}{K_{Lf} L_f}, \quad b_i^r = \frac{b_i}{K_{Lf}}, \quad b_c^r = \frac{b_c}{K_{Cf}}. \quad (5.3)$$

Conviene retener que las dos ganancias factorizan pero a_i^r no, porque esa asimetría reaparece en el criterio de estabilidad. Con la temporización del Escenario 2, $T_s = 214.6 \mu s$, los valores nominales dan $a_i \simeq 0.99914$, $b_i = 0.0715$ A/V y $b_c = 0.4292$ V/A.

El lazo se reduce a su forma analítica mínima. La estrategia predictiva impone corriente *deadbeat* y predice dos pasos para compensar el retardo de cómputo, de modo que con la

acción $u(k)$ ya aplicada,

$$\hat{i}_f(k+1) = a_i i_f(k) + b_i(u(k) - v_c(k)), \quad (5.4)$$

$$\hat{v}_c(k+1) = v_c(k) + b_c i_{cap}(k), \quad (5.5)$$

$$u(k+1) = \hat{v}_c(k+1) + \frac{1}{b_i}(i_f^{ref} - a_i \hat{i}_f(k+1)), \quad i_f^{ref} = i_o + K_v(v_c^{ref} - v_c(k)), \quad (5.6)$$

con $K_v = 0.466$ A/V la ganancia proporcional del lazo de tensión *grid-forming*. El control base evalúa estas tres expresiones con los coeficientes nominales y la PINN activa los sustituye por los efectivos, que es exactamente donde entra el desajuste. El integrador sobre el eje directo, el estado del filtro *washout*, la saturación y la modulación se omiten para obtener una referencia analítica manejable, y se conservan en las simulaciones del contraste.

5.1.2. Construcción del lazo cerrado y señales exógenas

Para la estabilidad interesa la respuesta *homogénea*, cómo evoluciona una desviación del estado sin excitación externa. Las señales exógenas, la corriente de salida i_o y la referencia v_c^{ref} , son entradas y no cambian la ubicación de los polos, así que se anulan ($i_o \rightarrow 0$, $v_c^{ref} \rightarrow 0$), y del lazo descrito por la ecuación (5.6) sobrevive la realimentación de estado $i_f^{ref} = -K_v v_c(k)$. Con $\mathbf{x}(k) = [i_f, v_c, u]^T$, cada fila se arma sustituyendo. La fila de i_f proviene directamente de la ecuación (5.1). La de v_c se obtiene de la ecuación (5.2) con $i_{cap} = i_f$ y usando la fila de i_f para $i_f(k+1)$. La de u sustituye las ecuaciones (5.4)–(5.5) y $i_f^{ref} = -K_v v_c$ en la ecuación (5.6), y agrupa por estado,

$$u(k+1) = \left(b_c - \frac{a_i^2}{b_i}\right)i_f(k) + \left(1 - \frac{K_v}{b_i} + a_i\right)v_c(k) - a_i u(k). \quad (5.7)$$

Reuniendo las tres filas, $\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}_{cl}(\mathbf{K}) \mathbf{x}(k)$ con

$$\mathbf{A}_{cl} = \begin{bmatrix} a_i^r & -b_i^r & b_i^r \\ b_c^r - R_{fc}^r(1 - a_i^r) & 1 - R_{fc}^r b_i^r & R_{fc}^r b_i^r \\ b_c - \frac{a_i^2}{b_i} & 1 - \frac{K_v}{b_i} + a_i & -a_i \end{bmatrix}. \quad (5.8)$$

Las dos primeras filas son la planta real, la tercera el controlador con modelo nominal, el desajuste vive en que las filas de planta llevan superíndice r y la de control no. Esta matriz no es el modelo de orden completo del Escenario 2. En particular, no incorpora el estado integral de tensión ni el pasa altos del amortiguamiento activo. Tampoco representa la selección discreta del Escenario 1. Sus autovalores delimitan el modelo reducido y sirven para formular hipótesis verificables, no para certificar por sí solos la estabilidad de las implementaciones completas.

5.1.3. Criterio de estabilidad y límite analítico del lazo de corriente reducido

Los polos del lazo son los autovalores z_i de $\mathbf{A}_{cl}$, raíces del polinomio característico $P(z) = \det(z\mathbf{I} - \mathbf{A}_{cl})$. El modelo homogéneo lineal y no saturado es estable si y solo si todos quedan dentro del círculo unitario, $\max_i |z_i| < 1$. El cruce de un polo por $|z| = 1$ define el

umbral K^{ref} de ese modelo. El único subsistema con solución cerrada es el lazo de corriente aislado. Con la versión de un paso de la ecuación (5.6), $u(k) - v_c(k) = (i_f^{ref} - a_i i_f(k))/b_i$, sustituida en la ecuación (5.1),

$$i_f(k+1) = \left(a_i^r - \frac{b_i^r}{b_i} a_i\right) i_f(k) + \frac{b_i^r}{b_i} i_f^{ref}, \quad z_{i_f} = a_i^r - \frac{a_i}{K_{Lf}} = 1 - \frac{1}{K_{Lf}}, \quad (5.9)$$

donde, con $\beta = R_f T_s / L_f$, se cancelan los términos $a_i^r = 1 - \beta / K_{Lf}$ y $a_i / K_{Lf} = (1 - \beta) / K_{Lf}$. La condición $|z_{i_f}| < 1$ se abre en

$$-1 < 1 - \frac{1}{K_{Lf}} < 1 \iff \underbrace{\frac{1}{K_{Lf}} < 2}_{K_{Lf} > 1/2} \text{ y } \underbrace{\frac{1}{K_{Lf}} > 0}_{\text{siempre}} \implies \boxed{K_{Lf} > \frac{1}{2}}. \quad (5.10)$$

El lazo *deadbeat* reducido se desestabiliza en el lado liviano cuando la inductancia real cae bajo la mitad del modelo, porque la ganancia $b_i^r / b_i = 1 / K_{Lf}$ supera 2 y el paso de corrección sobredispara, con cruce en $z = -1$. En el lado pesado el polo tiende a $z \rightarrow 1^-$ y el lazo se hace lento sin cruzar en esta reducción. Los barridos G1 de las Secciones 5.5.3 y 5.6.3 permiten contrastar la cota con las implementaciones completas, de forma directa para el Escenario 2 y como referencia empírica para el Escenario 1.

La cota con la corrección habilitada. La ecuación (5.10) se derivó con el predictor usando el valor nominal de la inductancia. Cuando la PINN está activa el modelo interno pasa a ser $\rho_{Lf} L_f$, de modo que la ganancia del lazo deja de ser $1 / K_{Lf}$ y se convierte en el cociente entre lo estimado y lo real,

$$\gamma_i = \frac{\rho_{Lf}}{K_{Lf}}, \quad z_{i_f} = 1 - \gamma_i, \quad \boxed{0 < \rho_{Lf} / K_{Lf} < 2} \quad (5.11)$$

La cota nominal corresponde a $\rho_{Lf} = 1$. Para factores positivos constantes, la corrección modifica el polo del lazo reducido de un paso. Con $0 < \rho_{Lf} \leq 5$, la condición se cumple si $K_{Lf} > 2.5$, mientras por debajo depende de ρ_{Lf} / K_{Lf} . Esta reducción excluye estimador, lazos externos, amortiguamiento filtrado y saturación, por lo que no certifica el sistema completo ni una mejora sobre el nominal.

Contraste con la campaña. La cota de la ecuación (5.10) admite verificación directa sobre el Escenario 2 en modo conectado a la red, que es el esquema modulado de acción continua con lazo K_v del que proviene la reducción. La Tabla 5.2 recorre la rama subnominal del grupo G1 y pone lado a lado el módulo del polo reducido y el error medido. Sin corrección ese módulo vale $|z_{i_f}| = |1 - 1 / K_{Lf}|$ y alcanza la unidad justo en $K_{Lf} = 0.50$. Con corrección vale $|1 - \rho_{Lf} / K_{Lf}|$ y se evalúa con el factor que la PINN entrega en cada nivel.

Tabla 5.2

POLO DEL LAZO REDUCIDO Y ERROR MEDIDO EN LA RAMA SUBNOMINAL DE G1, ESCENARIO 2 EN MODO CONECTADO A LA RED.

K_{Lf}	$ z_{i_f} $ sin PINN	$ z_{i_f} $ con PINN	RMSE sin [A]	RMSE con [A]
0.60	0.667	0.183	3.72	3.79
0.55	0.818	0.253	3.74	3.81
0.50	1.000	0.342	3.76	3.84
0.45	1.222	0.456	22.49	3.88
0.40	1.500	0.604	26.68	3.93
0.35	1.857	0.800	33.95	4.00
0.30	2.333	0.958	43.75	4.46
0.25	3.000	0.989	54.28	5.43
0.20	4.000	1.010	73.40	8.05
0.05	19.000	1.012	399.34	103.45

La lectura confirma la cota y a la vez acota su alcance. La serie sin corrección permanece en el piso de la métrica, entre 3.72 y 3.76 A, mientras el polo reducido está dentro del círculo, y salta a 22.49 A en el primer nivel en que sale, de modo que el codo medido cae entre $K_{Lf} = 0.50$ y 0.45, es decir sobre la cota analítica y dentro de la resolución del barrido. **La coincidencia es exacta a la resolución del barrido.** La serie con corrección conserva ese piso hasta $K_{Lf} = 0.35$, se despegas en 0.30 con 4.46 A, cuando el polo llega a 0.958, y crece desde ahí en adelante. La corrección desplaza por lo tanto la frontera desde 0.50 hasta la vecindad de 0.30, que es lo que anticipa la ecuación (5.11), y no la elimina.

Por debajo de la frontera la campaña no registra divergencia. Sobre los cuarenta niveles con $K_{Lf} \leq 0.50$ de las cuatro condiciones, la corrección reduce el error en treinta y nueve y supera el umbral de rescate en esos mismos treinta y nueve, y un solo nivel queda fuera de la ventana métrica. En el Escenario 1 no aparece codo alguno, porque el conjunto finito no implementa la inversión *deadbeat* ni el lazo K_v de la reducción. El error crece de forma continua desde el nominal y la corrección mejora en todos los niveles, con una mediana del +62.6 % en modo conectado a la red y del +58.5 % en isla, superiores al +41.4 y al +30.4 % que entrega la rama subnominal completa, es decir los diecinueve niveles con $K_{Lf} < 1$.

Lo que sí cambia bajo la cota es la calidad de la identificación y la escala del punto de operación, no la estabilidad del lazo. El error de identificación $|\ln(\rho_{Lf}/K_{Lf})|$ pasa del 7.3 al 50.6 % entre $K_{Lf} = 0.50$ y 0.05 en el Escenario 1 en modo conectado a la red, y del 29.4 al 69.9 % en el Escenario 2. En $K_{Lf} = 0.05$ la estimación queda apoyada contra su propio acotamiento inferior, con $\rho_{Lf} = 0.083$ en el Escenario 1 y 0.101 en el Escenario 2 frente a un valor verdadero de 0.05, que coincide con el borde del rango admisible. En paralelo el punto de operación deja de ser el nominal, porque un inductor veinte veces más liviano atenúa mucho menos. En $K_{Lf} = 0.05$ la corriente RMS de salida del maestro sube de los 54.55 A nominales a 213.19 A sin corrección y a 101.34 A con ella en el Escenario 1, y de 53.17 a 383.52 y 115.77 A en el Escenario 2. La métrica registra allí un régimen que el filtro ya no atenúa, y no un polo que abandona el círculo unitario.

La cota inferior del eje capacitivo. El segundo subsistema con solución cerrada es el eje de C_f . Descartando el retardo, es decir el estado u , $\mathbf{A}_{cl}$ se reduce a dos estados $[i_f, v_c]$, y con

$K_{Lf} = 1$ queda

$$\mathbf{A}_{cl}^{(2)} = \begin{bmatrix} 0 & -K_v \\ b_c/K_{Cf} & 1 \end{bmatrix}, \quad P(z) = z^2 - z + \frac{K_v b_c}{K_{Cf}}. \quad (5.12)$$

En el entorno de la frontera las raíces de $P(z)$ son un par complejo conjugado, cuyo producto es el término independiente, de modo que $|z|^2 = K_v b_c / K_{Cf}$ y la condición de permanencia en el círculo unitario se lee de forma directa,

$$\frac{K_v b_c}{K_{Cf}} < 1 \implies K_{Cf} > K_v b_c = K_v \frac{T_s}{C_f}, \quad (5.13)$$

y el criterio de Jury generaliza esa lectura a los órdenes superiores del mismo polinomio [54, 55].

La cota (5.13) depende del producto $K_v T_s$ y no de cada factor por separado, y ese producto se conservó al migrar el esquema modulado desde su configuración inicial de 10 kHz. Con $K_v = 1.0$ A/V y $T_s = 100$ μ s entrega 0.200, y con $K_v = 0.466$ A/V y $T_s = 214.6$ μ s vuelve a entregar 0.200, porque la ganancia se reescaló por el cociente de los periodos justamente para conservar la dinámica proporcional del controlador. La cota vale por lo tanto $K_{Cf} > 0.2$ antes y después del reajuste, y cae dentro del barrido axial, que desciende hasta $K_{Cf} = 0.05$ y deja cuatro niveles por debajo de ella.

Las dos referencias acotan ejes distintos y no deben compararse entre sí, porque la inductiva sale del subproblema *deadbeat* de corriente y la capacitiva requiere además el lazo K_v . Frente a los datos tampoco se comportan igual. La cota inductiva se verifica como codo en el Escenario 2 en modo conectado a la red, según la Tabla 5.2, y en el Escenario 1 en isla se manifiesta como cambio de escala, con un error medio sin corrección de 24.1 V por debajo de $K_{Lf} = 0.5$ frente a 6.1 V entre esa cota y el nominal.

La cota capacitiva, en cambio, no se verifica como codo en ninguna de las cuatro condiciones. Bajo ella el barrido recorre solo cuatro niveles, de 0.05 a 0.20 en pasos de 0.05, y en ninguno la serie sin corrección acelera su crecimiento. En el Escenario 1 el error crece de forma continua desde 20.69 hasta 24.53 A en modo conectado a la red y desde 20.09 hasta 30.02 V en isla, y en el Escenario 2 en isla desde 66.35 hasta 79.62 V, sin escalón en $K_{Cf} = 0.2$. Lo que sí ocurre en la vecindad de la cota, y solo en el Escenario 1 en isla, es un cambio de signo del aporte de la corrección, del +45.3 % sobre la cota misma al -79.3 % en $K_{Cf} = 0.05$, donde la corrección empeora con 53.8 frente a 30.0 V. Conviene registrar esa coincidencia sin convertirla en validación, porque el conjunto finito no implementa el lazo K_v del que la cota proviene, y en el Escenario 2, que sí corresponde a la reducción, la corrección rescata en los cuatro niveles en isla, con mejoras entre el +20.2 y el +84.1 %.

La razón de esa asimetría está en la propia derivación. La cota inductiva se desplaza cuando la corrección actúa, porque el factor estimado entra en la ganancia del lazo y la convierte en ρ_{Lf}/K_{Lf} , según la ecuación (5.11). La capacitiva no se desplaza, porque K_v es una ganancia de diseño fija y el factor estimado no aparece en la reducción de dos estados de la ecuación (5.12), de modo que pertenece a la planta y no al modelo que el predictor lleva dentro. Bajo ambas el mecanismo que limita es de observabilidad antes que de estabilidad, con un error de identificación $|\ln(\rho_{Cf}/K_{Cf})|$ que pasa del 6.1 al 46.8 % entre $K_{Cf} = 0.20$ y 0.05 en el Escenario 1 en modo conectado a la red y del 3.4 al 88.1 %

en el Escenario 2 en isla, con la estimación apoyada contra el acotamiento inferior del rango admisible.

Ambas son cotas *inferiores* y ninguna explica el extremo superior de los grupos directos, donde las campañas muestran una discontinuidad abrupta y las dos se cumplen con holgura. Allí el lazo lineal no saturado sigue siendo estable y la pérdida de control tiene otro origen, que la subsección siguiente identifica y cierra en forma analítica.

5.1.4. Nivel de perturbación máximo según la disponibilidad de tensión

El criterio de Jury describe un lazo lineal en el que el actuador entrega siempre lo que se le pide. Esa hipótesis deja de valer cuando la tensión que el control solicita excede la que el puente puede sintetizar. Esta subsección obtiene esa segunda frontera, que resulta ser la que gobierna el extremo superior de los grupos de resonancia fija.

Tensión requerida por el inversor. El convertidor no impone la tensión del condensador sino la del nodo de entrada del inductor. Partiendo del control *deadbeat* de corriente implementado en el maestro, cuya acción es $u^* = (i_f^{ref} - a_i i_f) / b_i + v_c$ con $a_i = 1 - R_f T_s / L_f$ y $b_i = T_s / L_f$, y evaluando en régimen sinusoidal a la frecuencia fundamental, la tensión requerida es

$$v_{inv,pk} = v_{c,pk} + Z_f i_{L,pk}, \quad Z_f = R_f + j\omega L_f K_{Lf}. \quad (5.14)$$

La resistencia serie del inductor se conserva en Z_f , no se desprecia.

Corriente del inductor. Por la ley de corrientes de Kirchhoff en el nodo del condensador, $i_{L,pk} = i_{C,pk} + i_{o,pk}$. La rama capacitiva es el condensador en serie con la resistencia serie de rama, de modo que su admitancia exacta es

$$Y_C(K_{Cf}) = \left(R_{fc} + \frac{1}{j\omega C_f K_{Cf}} \right)^{-1} = \frac{j\omega C_f K_{Cf}}{1 + j\omega C_f K_{Cf} R_{fc}}. \quad (5.15)$$

La corriente de salida se obtiene del reparto y de la línea que une el filtro con el punto de acoplamiento común. Con dos esclavos que aportan un cuarto de la carga cada uno, el maestro cubre la mitad, $i_{o,pk} = v_{pcc,pk} / (2Z_{load})$, y con $v_{pcc,pk} = v_{c,pk} - Z_l i_{o,pk}$ resulta

$$i_{o,pk} = v_{c,pk} Y_m, \quad Y_m = \frac{1}{2Z_{load} + Z_l}, \quad Z_l = R_l + j\omega L_l. \quad (5.16)$$

El factor dos no es una impedancia física sino aparente. Los esclavos son fuentes de corriente controladas, de modo que para una tensión dada el maestro aporta solo la mitad de la corriente, lo cual es indistinguible, visto desde su terminal, de una carga del doble de impedancia. Esa impedancia aparente sí se suma en serie con la impedancia de línea, que es física y está en el camino de $i_{o,pk}$. La equivalencia vale mientras los esclavos sostengan su cuota, condición que se verifica en los registros.

Amortiguamiento activo. En el Escenario 2 la acción incluye el término de resistencia virtual sobre la corriente capacitiva, filtrada por el pasa altos de constante τ_{ad} ,

$$H(j\omega) = \frac{j\omega\tau_{ad}}{1 + j\omega\tau_{ad}}, \quad v_{inv,pk} = v_{c,pk} + Z_f i_{L,pk} - R_v H(j\omega) i_{C,pk}. \quad (5.17)$$

Que R_v sea constante es lo que permite mantener la forma cerrada. Un amortiguamiento adaptativo dependería del estado y obligaría a resolver el lazo completo.

Criterio. Reuniendo lo anterior y sacando $v_{c,pk}$ de factor común, la condición de no saturación es

$$v_{c,pk} |1 + Z_f(Y_m + Y_C) - R_v H(j\omega) Y_C| \leq V_{\max} \quad (5.18)$$

donde $V_{\max}$ es el límite de tensión sintetizable, que depende de la estrategia de actuación y se discute enseguida. El primer miembro es una función analítica exacta de K_{Lf} y K_{Cf} en la que intervienen la resistencia serie del inductor, la resistencia serie de la rama capacitiva, la impedancia de línea, el reparto de potencia y el amortiguamiento activo. El problema inverso es inmediato, la tensión mínima de bus para un par de factores dado es el primer miembro despejado.

Sobre la solución del nivel crítico. La ecuación (5.18) es exacta pero el despeje del nivel de perturbación que la satura no admite forma cerrada, porque R_{fc} aparece en el denominador de Y_C y el término de amortiguamiento introduce una dependencia adicional. Los niveles críticos que se reportan más adelante se obtienen por lo tanto de forma numérica sobre la expresión completa, sin aproximación alguna.

Un caso reducido deja ver, no obstante, la estructura del problema. En el grupo de resonancia fija, con $K_{Cf} = 1/K_{Lf}$, y despreciando únicamente R_f , R_{fc} y el amortiguamiento, la condición se reduce a una cuadrática exacta en el nivel K ,

$$a^2(G_m^2 + B_m^2)K^2 + (2a^2B_m c - 2aB_m)K + (a^2c^2 - 2ac + 1 - \rho^2) = 0, \quad (5.19)$$

con $a = \omega L_f$, $c = \omega C_f$, $\rho = V_{\max}/v_{c,pk}$ y $Y_m = G_m + jB_m$, donde

$$G_m = \frac{R_{load}}{2|Z_{load}|^2}, \quad B_m = \frac{-\omega L_{load}}{2|Z_{load}|^2}, \quad (5.20)$$

de manera que la conductancia procede de la resistencia de carga y la susceptancia, de signo negativo por ser la carga inductiva, procede de su inductancia. Esta forma reducida se emplea solo como apoyo interpretativo. Todos los valores publicados provienen de la ecuación (5.18) completa.

5.1.5. Límites de tensión de las dos actuaciones

El valor de $V_{\max}$ no es el mismo en los dos escenarios, según la geometría del hexágono que desarrolla el Capítulo 3, y esa diferencia resultó ser uno de los hallazgos con más consecuencias de esta memoria,

$$V_{\max}^{FCS} = \frac{V_{dc}}{\sqrt{3}} = 461.9 \text{ V}, \quad V_{\max}^{PWM} = \frac{V_{dc}}{2} = 400.0 \text{ V}. \quad (5.21)$$

La brecha **no es intrínseca a modular**, porque añadiendo una componente homopolar a las tres moduladoras, que el neutro flotante de la carga cancela y por lo tanto no altera la tensión de fase, el límite del esquema modulado se elevaría también hasta $V_{dc}/\sqrt{3}$. La memoria no incorpora esa modificación y la registra como línea de mejora, dejando constancia de que parte de la desventaja observada en el esquema modulado proviene de aquí.

Contraste con las campañas. La Tabla 5.3 compara el nivel crítico que predice la ecuación (5.18) con el observado, y dos precisiones fijan su valor. La primera es que todos los parámetros del criterio son los *nominales* de diseño, sin ninguna magnitud extraída de los registros, de modo que la predicción es a priori y no un ajuste a posteriori. La segunda es que el término de comparación no es la ruptura de las curvas de la campaña paramétrica sino la *frontera de divergencia*, determinada sobre niveles contiguos con las ventanas declaradas en la tabla. La ventana métrica de la campaña son 90 ms al final de un registro de un segundo y sirve para comparar dos configuraciones sobre la misma planta, no para localizar el instante en que una pierde el control, cosa que exige seguir la evolución durante segundos, como hacen los registros de la Subsección 5.6.11 y las Figuras 5.32 y 5.33.

Tabla 5.3

NIVEL CRÍTICO PREDICHO POR EL CRITERIO DE TENSIÓN FRENTE A LA FRONTERA OBSERVADA, MODO ISLA.

Caso	$V_{\text{máx}}$ [V]	K predicho	Frontera observada		Observación
			último estable	primero divergente	
Escenario 2, G4, con PINN	400.0	3.37	3.35	3.40	manual, 15 s
Escenario 2, G4, sin PINN	400.0	3.37	3.40	3.45	manual, 15 s
Escenario 1, G4, con PINN	461.9	4.37	4.25	4.30	manual
Escenario 1, G4, sin PINN	461.9	4.37	4.15	4.20	manual
Escenario 2, G2, con PINN	400.0	4.62	4.20	4.25	manual, 15 s
Escenario 1, G2, con PINN	461.9	4.53	4.05	4.10	manual
Escenario 1, G2, sin PINN	461.9	4.53	4.60	4.65	manual

Último estable identifica el último nivel sin colapso en la observación. En el Escenario 1 se verificó manualmente en PLECS, con divergencia de los casos límite dentro de 2 s, y en el Escenario 2, sobre 15 s. Las curvas de RMSE conservan la ventana de su propia campaña.

La Tabla 5.3 fija las fronteras manuales de referencia. Se distinguen de los siguientes indicadores de campaña.

1. *Fundamental, un segundo:* $fr = |V_{C,1}|/|V_{ref,1}|$ (Sección 5.6.9). La banda sana contigua al nominal exige $fr \geq 0.95$, mientras el indicador de colapso usa $fr < 0.60$.
2. *Tiempo de divergencia, quince segundos:* el postproceso busca desde 0.20 s ventanas de 100 ms y registra el centro de la primera con $f_r < 0.90$. Difiere del indicador corto tanto en duración como en umbral.
3. *Balance, un segundo:* la selección histórica de la Tabla 5.15 compara la salida con la mitad del máximo de su familia. Selecciona puntos energéticos, no fronteras de estabilidad.

Cada comparación conserva registro, duración y criterio, y la observación finita no demuestra estabilidad asintótica.

El Apéndice A.3 separa estos indicadores y sus fuentes de los intervalos manuales. Las recuperaciones aisladas del Escenario 1 no se consideran una banda estable continua.

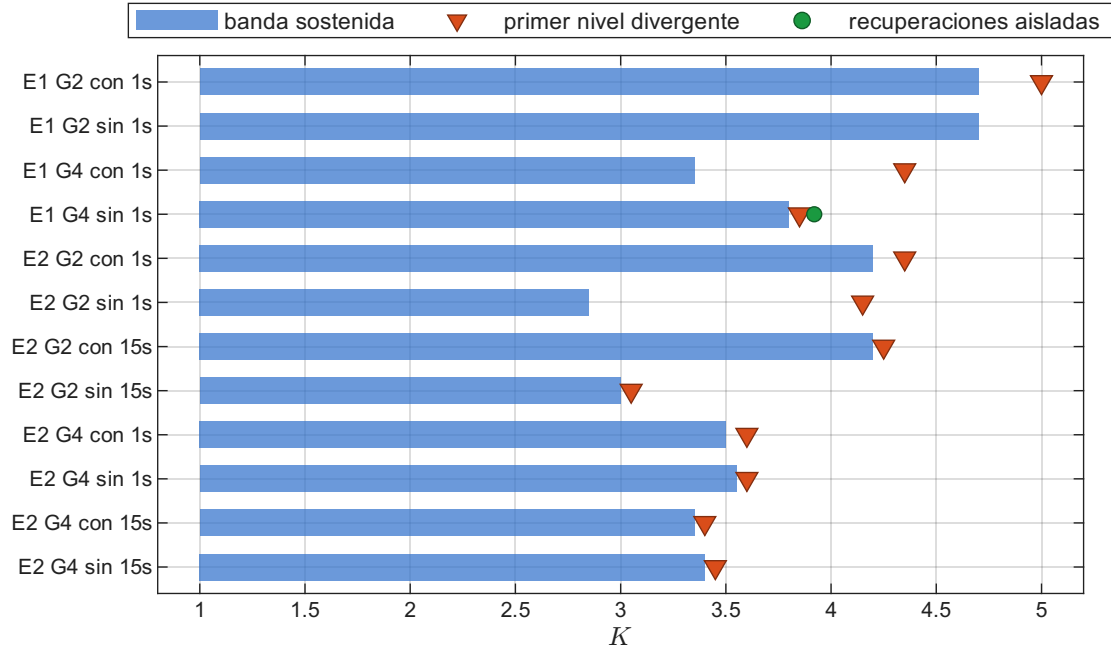


Figura 5.1. Indicadores de pérdida de seguimiento en modo isla.

La Figura 5.1 resume indicadores, no un umbral común. En G4 del Escenario 2, $f_r < 0.60$ aparece en $K = 3.60$ para ambas configuraciones al segundo, mientras la frontera manual de 15 s comienza en 3.45 sin PINN y 3.40 con ella. En G2, la banda corta $f_r \geq 0.95$ termina en 2.85 y 4.20, respectivamente. El registro largo conserva últimos niveles sin colapso de 3.00 y 4.20, y el caso sin PINN es un antecedente del apéndice, no una fila de la Tabla 5.3. El refinamiento del Escenario 2 usa un paso de 0.05 en torno al cambio de régimen. Con la PINN, $K = 3.35$ completa los quince segundos y $K = 3.40$ diverge a los 10.75 s. Sin la PINN, $K = 3.40$ completa el registro y $K = 3.45$ diverge a los 2.95 s. En el Escenario 1 el término de amortiguamiento activo de esa ecuación se anula, porque ese lazo pertenece solo al esquema modulado. Conviene retener que esas fronteras se midieron sobre registros de quince segundos y son por ello más estrictas que las que la campaña de un segundo declara, donde la misma familia del Escenario 2 se sostiene hasta $K = 3.50$ y colapsa en $K = 3.60$, según la Sección 5.6.9. La diferencia entre las dos medidas es la que motiva el repaso de ventana larga y no una discrepancia entre ellas.

Alcance del criterio. La tabla separa los dos comportamientos con nitidez. En el grupo de resonancia fija la predicción cae dentro del intervalo observado con PINN en el esquema modulado, 3.37 frente a una frontera entre 3.35 y 3.40. La frontera sin PINN queda entre 3.40 y 3.45, a menos de 0.1 del valor calculado. En G4 del conjunto finito, la predicción 4.37 supera las fronteras manuales [4.25, 4.30] con PINN y [4.15, 4.20] sin ella. La corrección desplaza el primer divergente de 4.20 a 4.30, sin alcanzar el valor predicho. En G2 del Escenario 2 con PINN, 4.62 supera el intervalo manual [4.20, 4.25]. En el Escenario 1, 4.53 se compara con [4.05, 4.10] con PINN y [4.60, 4.65] sin ella. La predicción de tensión no constituye, por tanto, un límite general de estabilidad.

La diferencia está en qué le ocurre al filtro al recorrer su recta. En el grupo de resonancia fija el producto $K_{Lf}K_{Cf}$ vale la unidad por construcción, la resonancia permanece

en 129.9 Hz durante todo el barrido. También varían la impedancia característica y el amortiguamiento relativo, y la concordancia con la cota no descarta su intervención. En el grupo de impedancia constante ambos factores crecen juntos y la resonancia desciende como

$$f_{res}(K) = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_f K_{Lf} C_f K_{Cf}}} = \frac{129.9}{K} \text{ Hz}, \quad (5.22)$$

hasta cruzar la fundamental en $K = 2.60$, a partir de donde la componente dominante queda por encima de la resonancia y cambia la relación entre la corriente interna y la transferida a la carga. Es coherente con la forma de las curvas, plana y de ruptura abrupta en el primer grupo y de crecimiento sostenido antes del colapso en el segundo.

Ese cruce es una referencia del modelo pasivo, no un umbral demostrado de degradación o colapso del lazo cerrado. El balance de la Sección 5.7.4 aporta la segunda evidencia, con una disipación de la rama capacitiva que crece aproximadamente con el cuadrado del nivel hasta ser del orden de la potencia transferida a la carga. Esa firma identifica una carga interna dominante, pero no demuestra por sí sola que sea la causa dinámica única del colapso, cuya determinación exacta exigiría un estudio de estabilidad del modelo completo que queda fuera del alcance de esta memoria.

Criterio adoptado para reportar las fronteras. Se adoptan las fronteras manuales de la Tabla 5.3: en G4, [3.35, 3.40] con PINN y [3.40, 3.45] sin ella para el Escenario 2, y [4.25, 4.30] y [4.15, 4.20] para el Escenario 1. En G2, el Escenario 2 con PINN presenta [4.20, 4.25], y el Escenario 1, [4.05, 4.10] con PINN y [4.60, 4.65] sin ella. RMSE y balance describen sus registros, sin redefinir esas fronteras.

5.1.6. Rango de entrenamiento frente a rango de compensación efectiva

Las dos cotas cerradas anteriores acotan por abajo, pero no dicen hasta dónde la corrección resulta útil. Esa pregunta es empírica y la campaña la responde. La PINN se entrenó sobre dos décadas, $K \in [0.05, 5]$, pero entrenar sobre un rango no garantiza compensar en todo ese rango, porque la utilidad de la corrección depende además de que el control base tenga un error paramétrico apreciable que recuperar y de que el punto de operación siga dentro del margen del convertidor.

La Tabla 5.4 traduce esa distinción a números. Para cada conjunto y cada modo recorre los niveles simulados en orden creciente de K y reporta los tramos contiguos en que la mejora supera el umbral de rescate de +5% definido en la Sección 5.4. Los conteos se recalculan desde los CSV finales. G1 y G3 contienen 99 niveles por modo, G2 y G4 contienen 96, y G5 reúne 100 condiciones no correlacionadas.

Tabla 5.4

COBERTURA DE COMPENSACIÓN EFECTIVA, DEFINIDA COMO LA FRACCIÓN DE NIVELES SIMULADOS CLASIFICADOS COMO RESCATE. G1 Y G3 CONTIENEN 99 NIVELES POR MODO, G2 Y G4 CONTIENEN 96, Y G5 CONTIENE 100.

Grupo	Referencia analítica o física	Escenario 1		Escenario 2	
		isla	red	isla	red
G1, axial L_f	$K_{L_f} > 1/2$	24 %	62 %	74 %	22 %
G2, Z_0 constante	$K_{C_f} > 0.2$ y $K_{L_f} > 1/2$	66 %	97 %	97 %	75 %
G3, axial C_f	$K_{C_f} > 0.2$	86 %	96 %	96 %	66 %
G4, resonancia fija	límite de tensión del convertidor	68 %	97 %	71 %	7 %
G5, no correlacionado	ambas, según el escenario	79 %	99 %	82 %	67 %

Los grupos se indexan por su nivel K , con una sola curva por familia y modo. La tabla resume tres fronteras que se aplican después sin volver a derivarlas. Cerca de $K = 1$ aparece una banda neutra, porque el modelo nominal ya coincide con la planta. La frontera inferior proviene de las ecuaciones (5.10) y (5.13), y según el contraste de las subsecciones anteriores actúa como umbral de estabilidad solo sobre el eje inductivo del esquema modulado, mientras que en las demás condiciones marca el tramo donde el error crece un orden de magnitud sin que el lazo pierda estabilidad. La superior, en isla, corresponde a la tensión disponible. La observabilidad determina si un parámetro estable puede identificarse con precisión. La cobertura es mayor en red para el Escenario 1 y mayor en isla para el Escenario 2, resultado que las Secciones 5.5 y 5.6 desglosan por grupo.

Las simulaciones extensas respaldan esta separación. En G4 directo del Escenario 2, $K_{L_f} = 3.40$ y $K_{C_f} = 0.294$ satisfacen las dos cotas de estabilidad, pero el lazo diverge con $V_{dc} = 800$ V y deja de hacerlo dentro del horizonte evaluado al elevar el bus a 1000 V. La evidencia es consistente con un límite de actuación y no con el polinomio lineal. Como esta frontera puede manifestarse en segundos, los resultados posteriores distinguen siempre la ventana métrica de la ausencia de divergencia observada en ensayos largos.

5.2. Identificación paramétrica en línea y mejora de la predicción

La PINN estima los factores que reconcilian el predictor con la planta. La métrica $|\ln(\rho/K)|$ se evalúa sobre la mediana de la ventana de régimen y permite comparar factores a lo largo de las dos décadas exploradas sin que los extremos dominen la estadística, porque trata por igual una sobreestimación y una subestimación de la misma proporción. Su lectura directa como desviación multiplicativa sobre el factor aplicado es

$$e^{|\ln(\rho/K)|} - 1 = \max\left(\frac{\rho}{K}, \frac{K}{\rho}\right) - 1, \quad (5.23)$$

que aproxima la métrica logarítmica para desviaciones pequeñas. Mide magnitud, no dirección, y solo coincide con $\rho/K - 1$ cuando se sobreestima el factor. En la Tabla 5.5, las filas de grupos, mediana global y percentil 90 expresan $100|\ln(\rho/K)|$. Las dos últimas convierten esos estadísticos mediante $100(e^{e_{\log}} - 1)$, con $e_{\log}$ sin multiplicar por cien. Los encabezados identifican el factor evaluado, no valores del cociente ρ/K .

Tabla 5.5

ERROR LOGARÍTMICO DE IDENTIFICACIÓN Y EQUIVALENCIA MULTIPLICATIVA, EN TANTO POR CIENTO.

Grupo	Error de ρ_{Lf}				Error de ρ_{Cf}			
	Escenario 1		Escenario 2		Escenario 1		Escenario 2	
	isla	red	isla	red	isla	red	isla	red
G1, axial L_f	4.5	5.4	19.6	4.5	2.6	0.8	3.9	2.4
G2, Z_0 constante	2.9	5.6	21.5	7.7	1.7	1.6	5.7	1.7
G3, axial C_f	2.3	0.8	5.3	5.2	2.0	2.1	4.8	1.3
G4, resonancia fija	4.1	4.9	8.0	4.9	6.5	3.2	6.8	4.1
G5, no correlacionado	3.2	5.5	8.1	28.7	6.4	3.2	8.1	5.3
Global, mediana	3.5		6.9		2.3		4.2	
Global, percentil 90	11.0		35.5		9.4		17.1	
Desv. multiplicativa de la mediana	3.5		7.2		2.3		4.3	
Desv. multiplicativa del percentil 90	11.7		42.6		9.8		18.7	

Cada celda resume las corridas con PINN de su grupo y modo, 99 condiciones en G1 y G3, 96 en G2 y G4 y 100 en G5, más el nominal. Las filas globales agregan las 982 corridas, es decir 491 condiciones en los dos modos, y las dos últimas las traducen a desviación multiplicativa. La Tabla 5.5 entrega tres lecturas.

Consistencia interna. En cada barrido axial, el parámetro no perturbado se estima mejor que el que recorre una década. En G1 el error de ρ_{Cf} es 2.6 % frente a 4.5 % de ρ_{Lf} . En G3 la relación se invierte, 2.3 frente a 2.0 %, aunque con un margen mucho más estrecho. La Figura 5.15 muestra que la PINN distingue ambos parámetros a lo largo del barrido.

Diferencia de observabilidad. En el agregado global, ρ_{Cf} presenta cerca de la mitad del error de ρ_{Lf} en ambos escenarios. La tendencia no se cumple en cada grupo por separado, en particular se invierte en G3 y en algunas condiciones de G4. La tensión del condensador se mide directamente, mientras la inductancia entra mediante $b_i = T_s/L_f^{eff}$ y su efecto por muestra es proporcional a T_s . Esta estructura es compatible con la ventaja global observada para C_f , sin probar que sea su única causa.

Intercambio medido en el esquema modulado. El error global de ρ_{Lf} pasa de 3.5 a 6.9 %, y el de ρ_{Cf} de 2.3 a 4.2 %. Las razones entre escenarios, evaluadas sobre las medianas antes de redondear, valen 2.00 y 1.85 y quedan en el entorno de la razón entre periodos de muestreo, $214.6/100 = 2.15$. Es una concordancia numérica y no una relación causal demostrada, porque entre los dos escenarios también cambian el modulador, el amortiguamiento activo y los lazos externos. La variación de ρ_{Lf} con la consigna activa sobre la misma planta (Tabla 5.20) motiva examinar la excitación, sin aislar el efecto del modulador o de T_s . El hecho establecido es que, bajo esfuerzo de conmutación equiparable, el Escenario 2 identifica con cerca del doble de error. Aislar la contribución exacta de T_s exigiría reajustar las dos redes neuronales sobre datos generados con un periodo de muestreo común, porque el periodo entra en el vector de entrada y en su normalización, de modo que no es un reproceso de las campañas existentes.

La tercera salida heredada de la arquitectura está asociada a R_{fc} y no es un factor adaptativo en los modelos finales. Como la planta mantiene $K_{R_{fc}} = 1$ en todo el entrenamiento, los encabezados exportan $\mu_{y,R_{fc}} = 0$ y $\sigma_{y,R_{fc}} = 0$, la desnormalización entrega $\rho_{R_{fc}} = 1$ exactamente y el predictor conserva la resistencia nominal. Los resultados históricos de aquel canal quedan en el Apéndice A.6 y no sostienen ninguna conclusión de este capítulo.

El efecto sobre la predicción se evalúa además fuera de línea en los 50 escenarios de validación de cada modo, propagando el predictor nominal y el corregido en lazo abierto hasta $k+1$, $k+2$ y $k+3$ con tensión aplicada y corriente de salida medidas. En el horizonte $k+3$, que es el que el costo penaliza, la mediana de reducción del RMSE de la tensión del condensador es del 76.2 % en conexión a red y del 57.9 % en isla, y el RMSE de la corriente del inductor baja de 14.2 a 3.4 A y de 24.0 a 3.8 A respectivamente. La reducción crece con el horizonte, del 54.9 al 76.2 % en red entre $k+1$ y $k+3$, lo que es compatible con la acumulación del error paramétrico y anticipa el mejor desempeño del Escenario 1 en modo conectado a la red que la Sección 5.5 confirma en lazo cerrado. Se enuncia como predicción y no como resultado, porque esta prueba es de lazo abierto.

5.3. Desempeño en lazo cerrado y límites físicos de actuación

Esta sección establece dos cosas que las campañas por grupos usan después y que conviene fijar antes de entrar en ellas. La primera es la asimetría entre modos, que determina dónde puede aportar la corrección y organiza la lectura del resto del capítulo. La segunda es un resultado propio del conjunto de simulaciones que las cotas analíticas no anticipan, que la frontera de tensión responde a la combinación de los dos parámetros del filtro y no a la inductancia por sí sola.

El efecto de la corrección en lazo cerrado difiere de forma marcada entre modos de operación. En modo conectado a la red el margen que la identificación puede recuperar depende de cuánto error deje el control base, y los dos escenarios dejan cantidades distintas. El conjunto finito deja un margen amplio, mientras el esquema modulado lo reduce con sus lazos externos y deja menos que ganar. En isla el comportamiento depende del lazo de tensión, donde el conjunto finito no tiene integrador, mientras el modulado integra el eje directo, no el de cuadratura. La ausencia de acción integral no explica ambos casos. Las Secciones 5.5 y 5.6 miden esa inversión grupo a grupo.

Sobre esa asimetría se superponen las dos fronteras derivadas en la Sección 5.1, la de estabilidad discreta y la de tensión disponible. El conjunto de simulaciones añade una precisión sobre la segunda que las cotas analíticas no anticipan por sí solas. **El límite de tensión responde a la combinación de L_f y C_f , y no a la inductancia por sí sola.** El barrido axial permite separar ambas contribuciones, y en las condiciones evaluadas un aumento puro de la inductancia no produce el colapso que sí produce su combinación con una capacitancia reducida. Una inductancia alta eleva la caída de tensión requerida, mientras una capacitancia baja reduce el soporte capacitivo y la rigidez de la tensión del filtro. La impedancia característica $Z_0 = \sqrt{L_f/C_f}$ reúne ambos efectos, y esa es la razón de que el criterio de la ecuación (5.18) sea función de los dos factores y no de uno.

La consecuencia sobre el alcance es que la frontera superior pertenece al dimensionamiento del bus y de la carga, y no al modelo que el controlador corrige. La sección siguiente fija las convenciones con que se recorre el espacio completo de perturbaciones y cuantifica

dónde y cuánto aporta la corrección en cada caso.

5.4. Caracterización sistemática por grupos de perturbación

Esta sección fija de una vez las convenciones que gobiernan las dos campañas de validación, la del Escenario 1 en la Sección 5.5 y la del Escenario 2 en la Sección 5.6. Ambas comparten métrica, umbral de clasificación, definición de grupos y criterio de lectura, de modo que se enuncian aquí y no se repiten después.

5.4.1. Métrica de régimen y clasificación

Para cada corrida se toma la ventana de régimen permanente $\mathcal{W} = [t_f - 0.10 \text{ s}, t_f - 0.01 \text{ s}]$, con t_f el instante final de la simulación, lo que excluye el transitorio inicial y el borde final del registro. Dentro de esa ventana se construye, muestra a muestra y por fase, el error de seguimiento de la señal relevante al modo. Tomando como ejemplo la tensión formada en modo isla, el error de la fase $f \in \{a, b, c\}$ es $e_{vC,f}(k) = v_{C,f}^{ref}(k) - v_{C,f}(k)$, y su valor cuadrático medio por fase junto al indicador final promediado entre las tres fases son

$$\text{RMSE}_f = \sqrt{\frac{1}{N_{\mathcal{W}}} \sum_{k \in \mathcal{W}} e_{vC,f}(k)^2}, \quad \text{RMSE} = \frac{1}{3} \sum_{f \in \{a,b,c\}} \text{RMSE}_f, \quad (5.24)$$

con $N_{\mathcal{W}}$ el número de muestras de la ventana. En modo conectado a la red la señal relevante es la corriente de salida, con $e_{io,f}(k) = i_{o,f}^{ref}(k) - i_{o,f}(k)$ y la misma construcción. Este es exactamente el valor que grafican todas las curvas de error frente al nivel de perturbación de este capítulo. Sobre él se define la mejora porcentual

$$\Delta_{\%} = 100 \frac{\text{RMSE}_{\text{sin PINN}} - \text{RMSE}_{\text{con PINN}}}{\text{RMSE}_{\text{sin PINN}}}, \quad (5.25)$$

y cada nivel se clasifica en *rescate* si $\Delta_{\%} > 5\%$, *neutralidad* si $|\Delta_{\%}| \leq 5\%$ y *daño* si $\Delta_{\%} < -5\%$. Como la ecuación (5.25) normaliza por el error sin PINN, un denominador pequeño puede producir porcentajes grandes a partir de diferencias absolutas menores. Por ello, cada clasificación se interpreta junto con los dos RMSE y no solo con el porcentaje.

La métrica describe la ventana de 90 ms evaluada y no prueba estabilidad asintótica. Para las colas de G2 y G4 en isla se realizaron simulaciones de hasta 60 s, documentadas en el Apéndice A. Esas pruebas son las que determinan si una mejora inicial se sostiene. Los puntos afectados corresponden a perturbaciones extremas, fuera de la banda de degradación física principal discutida en la Sección 4.6.7.

5.4.2. Grupos de perturbación y nivel K

La geometría de G1–G5 se definió en la Sección 4.6.7. Para leer las figuras basta recordar que G1 y G3 son barridos axiales de L_f y C_f , G2 y G4 son direcciones acopladas y G5 reúne condiciones no correlacionadas. La rejilla usa paso 0.05. Las curvas axiales incorporan una ampliación de la rama subnominal, comprimida en el eje lineal. La cota inferior $K = 0.2$ de los grupos acoplados coincide con el límite reducido de la ecuación (5.13).

En todas las campañas la planta se perturba mediante $\mathbf{K} = [K_{Lf}; K_{Cf}; 1]$, de modo que solo la inductancia y la capacitancia del maestro se apartan de su valor nominal. La PINN conserva tres salidas, pero la tercera se desnormaliza en la unidad. Los esclavos permanecen nominales para aislar el desajuste del maestro, salvo en el Escenario 3 de la Sección 5.10, donde las tres unidades se perturban a la vez.

Las medianas se reportan también por rama porque $K < 1$ y $K > 1$ representan regímenes físicos distintos y una mediana global puede ocultar signos opuestos. G5 se analiza por severidad, pues sus dos factores se muestrean de forma independiente.

5.4.3. Alcance de la comparación

La comparación se hace siempre entre dos simulaciones con la misma planta, las mismas referencias y el mismo reparto de potencia. En la primera, el MPC predice con parámetros nominales. En la segunda, la PINN estima los factores de escala y corrige los parámetros efectivos del predictor según la ecuación (4.121), con el recorte $[0.05; 5]$ definido en el Capítulo 4. La temporización de cada escenario es la de la comparación a igual esfuerzo de conmutación, con el conjunto finito actualizado cada $100 \mu s$ y frecuencia efectiva medida de 2333 Hz, y el modulado con portadora de 2330 Hz, doble actualización y $T_s = 214.6 \mu s$.

La PINN aporta cuando el error dominante es paramétrico, queda próxima a la neutralidad cuando el MPC nominal ya es competente y puede degradar al entrar en una región no accionable o numéricamente frágil. Los tramos correspondientes se resumen en la Tabla 5.4. El cuerpo conserva las curvas que sostienen esta comparación y cuatro formas de onda que revelan mecanismos de frontera. Las demás formas de onda y los diagnósticos auxiliares se reúnen en el Apéndice B.

Los mínimos anotados en las curvas y cómo leerlos. Las figuras de error de régimen frente al nivel de perturbación anotan, para cada configuración, el mínimo que su curva alcanza y el nivel en que lo hace. La Tabla 5.6 los reúne, y conviene fijar su lectura antes de recorrer los grupos, porque no son un indicador de mejora.

Tabla 5.6

MÍNIMO DEL ERROR DE RÉGIMEN DE CADA CURVA Y NIVEL EN QUE SE ALCANZA. CADA MÍNIMO ES EL PISO DE ERROR DE SU CONFIGURACIÓN, NO UN TÉRMINO DE COMPARACIÓN ENTRE AMBAS, PORQUE SE ALCANZAN EN NIVELES DISTINTOS.

		sin identificación		con identificación	
Grupo	Modo	mínimo	en K	mínimo	en K
<i>Escenario 1, conjunto finito</i>					
G1	isla	2.73	3.90	3.00	4.85
G1	red	2.50	1.85	2.88	4.90
G2	isla	1.51	1.25	4.53	0.90
G3	isla	1.89	1.30	4.55	1.55
G4	isla	2.81	0.80	4.26	1.85
G4	red	4.49	0.95	1.15	4.60
<i>Escenario 2, MPC modulado</i>					
G1	isla	0.39	1.55	2.33	2.30
G1	red	3.61	3.25	1.02	4.70
G2	isla	1.25	1.05	3.91	0.60
G3	isla	1.69	1.05	2.87	0.45
G4	isla	1.50	0.90	3.15	1.40
G4	red	2.49	3.50	2.52	3.50

Los errores están en voltios en modo isla y en amperios en modo conectado a la red, y se omiten las filas cuyo mínimo coincide con el del grupo axial homólogo.

Tres lecturas se desprenden de la tabla. La primera es que **el mínimo de la curva corregida no es una mejora sino un piso**. La identificación tiene un error propio, cuantificado en la Sección 5.2, y ese error se traslada al predictor como una incertidumbre residual que ninguna cantidad de perturbación puede reducir. Por eso el mínimo corregido está por encima del mínimo sin corregir en casi todos los grupos en isla, y por eso esos dos números no deben compararse entre sí, ya que se alcanzan en niveles distintos y describen situaciones físicas distintas.

La segunda es que **el control base no alcanza su mejor punto en el nominal**. El caso más claro es el barrido axial de inductancia del Escenario 2 en isla, cuyo mínimo sin identificación vale 0.39 V en $K = 1.55$ y no en $K = 1$. La razón es directa, la ganancia del lazo de corriente vale $1/K_{Lf}$, de modo que una inductancia real mayor que la del modelo la reduce a 0.645 y amortigua un lazo que en el nominal es exactamente *deadbeat*. Es un desajuste que ayuda, y explica por qué en ese entorno la mejora relativa de la corrección resulta muy negativa aunque su error absoluto siga siendo modesto.

La tercera es que **en modo conectado a la red la relación se invierte en los grupos acoplados**. En el grupo de resonancia fija del Escenario 1 el mínimo corregido vale 1.15 A frente a los 4.49 A del base, y se alcanza además en el extremo del barrido, $K = 4.60$, que es donde el desajuste es máximo. Ahí la corrección sí opera en el régimen para el que se diseñó.

5.5. Escenario 1, FCS-MPC

Esta sección aplica al conjunto finito las convenciones que la anterior fijó, y recorre las cinco familias de perturbación en los dos modos de operación, primero el caso nominal, después cada grupo y por último la calidad de la identificación y el límite de tensión.

5.5.1. Diseño de la campaña y resolución del barrido

La campaña del conjunto finito recorre el mismo espacio de perturbación y con la misma rejilla que la del esquema modulado, de modo que los dos escenarios quedan comparables condición a condición. Los niveles siguen una progresión *lineal uniforme* de paso 0.05, por el motivo de lectura que expone la Sección 5.6.1, y las variantes directa e inversa dejan de exigir simulaciones propias porque un barrido que cruza el nominal recorre la recta completa.

Son 491 escenarios y 1964 corridas, dos modos de operación por dos configuraciones de control. La planta mantiene $K_{Rfc} = 1$ y $K_{Rf} = 1$ en la totalidad de la campaña.

Lo único que cambia respecto del esquema modulado es la actuación y su temporización. El conjunto finito evalúa los ocho vectores del inversor y aplica el ganador durante todo el periodo, sin modulador, con $T_s = 100 \mu s$. No hay amortiguamiento activo ni integrador en marco sincrónico sobre la tensión, porque esos dos lazos pertenecen al esquema modulado. Y el límite de tensión sintetizable es el del círculo inscrito en el hexágono, ecuación (5.21), un 15.5 % superior al del modulado.

5.5.2. Caso nominal y clasificación por régimen

Esta subsección establece el caso base del escenario y el criterio con el que se clasifican después las condiciones perturbadas. Las dos cosas se leen sobre la misma figura, la forma de onda de la tensión formada en ausencia de desajuste.

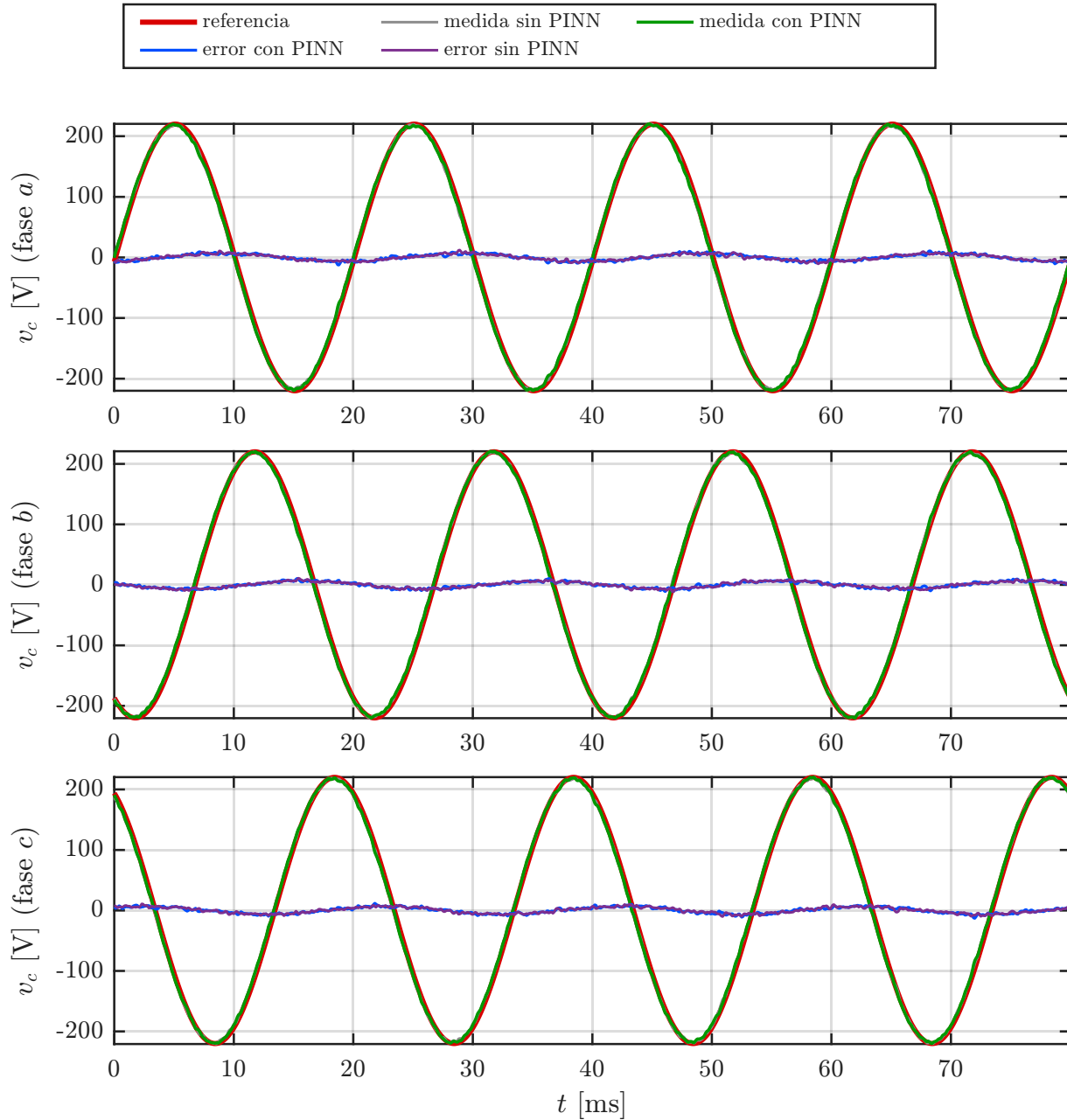


Figura 5.2. *Escenario 1, caso nominal en modo isla.*

La Figura 5.2 fija la referencia con la que se leen todas las curvas que siguen. Sin perturbación paramétrica el modelo interno del controlador coincide con la planta, de modo que la PINN no tiene desajuste que corregir y las dos configuraciones se superponen. Lo que la figura establece es el piso de error del esquema, asociado al *ripple* de conmutación y no al modelo, y ese piso es el que después separa una mejora real de una diferencia sin significado.

En el punto nominal el error de régimen pasa de 5.05 a 5.01 V en isla y de 4.41 a 4.60 A en modo conectado a la red. Las dos diferencias quedan por debajo del piso de sensibilidad, de modo que la condición nominal se clasifica como neutra en los dos modos.

Es el comportamiento esperado, en $K = 1$ no hay ningún desajuste que corregir y la corrección no puede sino añadir un error pequeño. La forma de onda nominal en red se conserva en la Figura B.1(a) del Apéndice B.

Tabla 5.7

ESCENARIO 1. MEDIANA DEL ERROR DE RÉGIMEN Y CLASIFICACIÓN POR GRUPO Y MODO, CON UMBRAL DE $\pm 5\%$ Y PISO DE SENSIBILIDAD.

Grupo	Modo	n	RMSE sin	RMSE con	mejora	resc.	neut.	daño
G1	isla	99	4.16	4.44	-6.3	18	67	14
G1	red	99	4.51	3.52	+15.9	53	21	25
G2	isla	96	23.73	4.69	+59.3	65	2	29
G2	red	96	43.76	14.81	+60.9	93	3	0
G3	isla	99	20.09	5.13	+71.8	85	2	12
G3	red	99	36.30	13.63	+57.3	94	5	0
G4	isla	96	12.99	6.33	+41.6	72	10	14
G4	red	96	13.43	2.59	+79.9	93	3	0
G5	isla	100	30.00	9.17	+55.8	85	8	7
G5	red	100	34.82	11.84	+66.8	98	1	1
NOM	isla	1	5.05	5.01	+0.7		—	
NOM	red	1	4.41	4.60	-4.2		—	

La Tabla 5.7 reúne el resultado de la campaña por grupo y modo, y es la referencia a la que remiten las cinco subsecciones que siguen. La clasificación aplica el umbral de $\pm 5\%$ junto al piso de sensibilidad que introduce la Sección 5.6.2. El criterio es el mismo en los dos escenarios, una condición cuya diferencia absoluta no supera el piso se cuenta como neutra sea cual sea el porcentaje, porque por debajo de ese valor la diferencia no se distingue del *ripple* de la actuación. El piso propio de este escenario se fija sobre su error nominal, que no coincide con el del modulado porque la frecuencia de conmutación efectiva y la forma de la actuación son distintas.

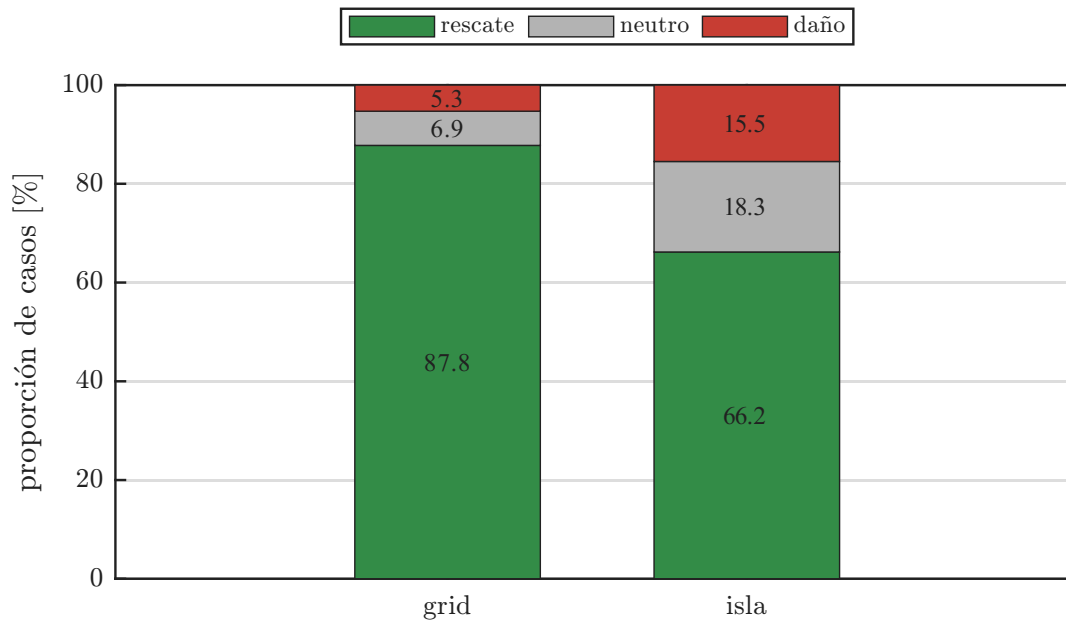


Figura 5.3. Escenario 1, reparto de regímenes por modo de operación.

La Figura 5.3 resume los 982 pares condición–modo. El reparto queda en 87.8 % de rescate, 6.9 % de neutro y 5.3 % de daño en modo conectado a red, y en 66.2 %, 18.3 % y 15.5 % en isla. De las 491 condiciones del modo conectado a la red, 34 quedan por debajo del piso de sensibilidad.

El contraste con el esquema modulado, que rescata el 46.8 % en modo conectado a la red y el 75.6 % en isla, revela una **inversión** que ninguna de las dos campañas por separado permitía ver. Cada esquema domina en un modo distinto, el conjunto finito en modo conectado a la red y el modulado en isla.

La explicación está en el error de partida y no en la calidad de la identificación. En modo conectado a la red el error mediano sin identificar vale 16.47 A en el conjunto finito y 6.98 A en el modulado. El esquema modulado incorpora un integrador en marco sincrónico sobre la corriente de salida que anula el error de régimen con independencia del modelo, de modo que no deja margen que recuperar y casi la mitad de sus condiciones caen en la banda neutra. El conjunto finito carece de ese lazo, conserva el margen, y la identificación lo recupera casi entero. En isla ocurre lo contrario, el error de partida del modulado es de 52.81 V frente a 13.53 V del conjunto finito, y ahí hay mucho más que rescatar.

El Escenario 1 respalda por contraste la lectura estructural que la Sección 5.6.2 propone para el esquema modulado.

5.5.3. Grupo G1, barrido axial de la inductancia

La primera familia recorre la inductancia del filtro dejando fija la capacitancia, de modo que la frecuencia de resonancia y la impedancia característica se desplazan a la vez. Es la dirección en la que el conjunto finito obtiene el menor margen de las cuatro familias acopladas.

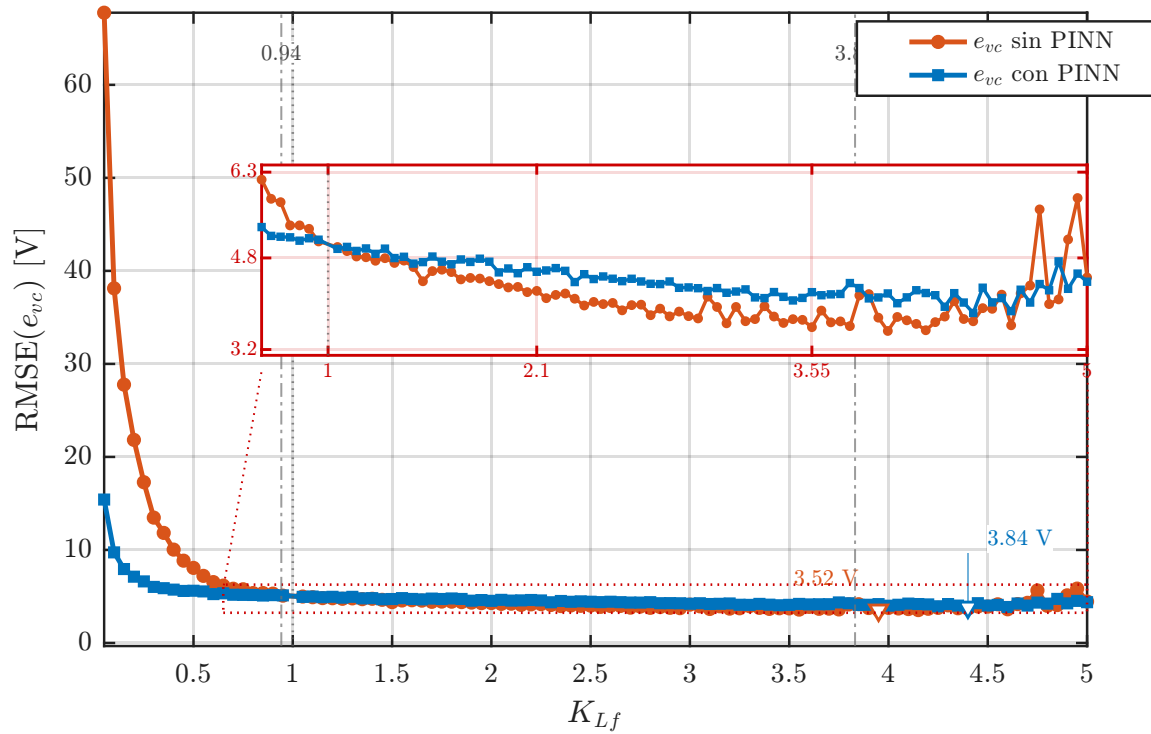


Figura 5.4. Escenario 1, grupo G1, variante directa, modo isla.

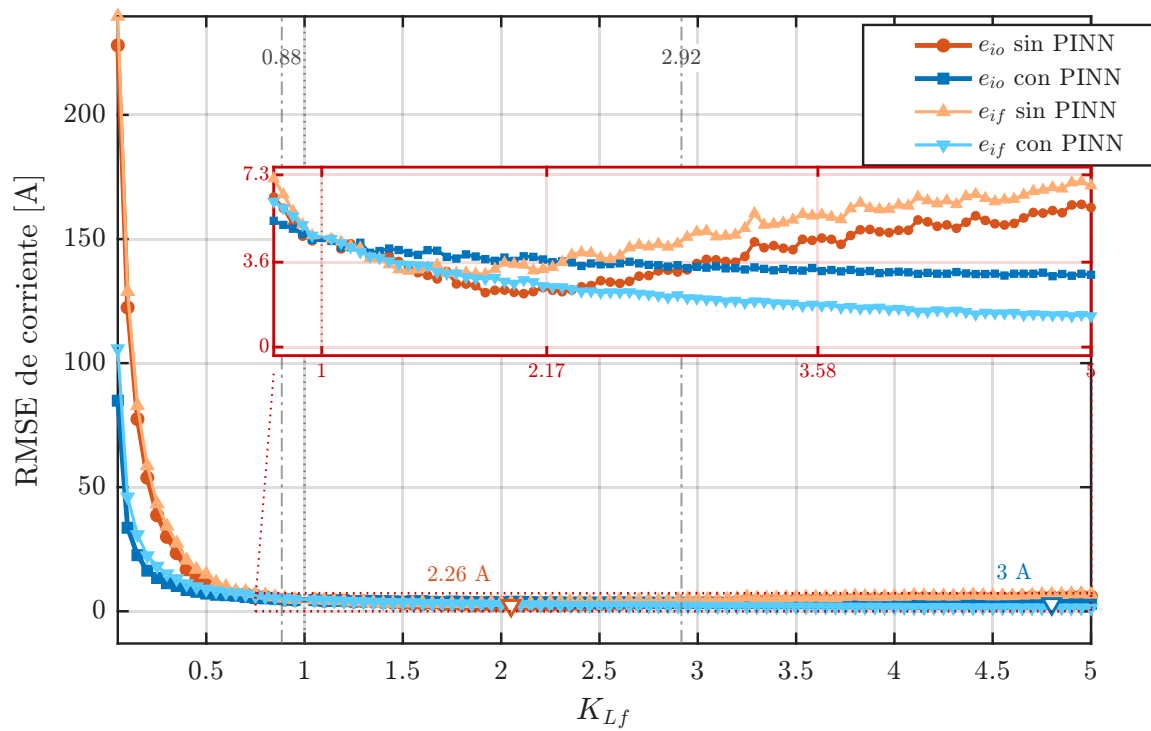


Figura 5.5. Escenario 1, grupo G1, variante directa, modo conectado a la red.

La Figura 5.4 muestra el barrido axial de la inductancia, el caso donde el conjunto

finito menos se beneficia de la corrección. La mediana de la mejora vale -6.3% sobre la familia completa, con 4.16 V sin la PINN frente a 4.44 V con ella. El detalle por rama permite interpretar el signo. Por encima del nominal la mediana cae a -7.8% , con 63 de 80 condiciones clasificadas como neutras, es decir con una diferencia que no supera el piso de sensibilidad. Por debajo del nominal la mediana sube a $+30.4\%$ y no hay una sola condición de daño. La lectura física es que en isla la variable controlada es la tensión del condensador, cuya dinámica depende de C_f y no de L_f salvo a través del lazo interno de corriente, de manera que sobreestimar la inductancia deja poco margen que recuperar.

La Figura 5.5 muestra que el mismo barrido en modo conectado a la red invierte el resultado. La mediana de la mejora vale $+15.9\%$, con 4.51 A sin la PINN frente a 3.52 A con ella, y el máximo alcanza $+72.5\%$ en el extremo inferior del barrido. La razón es que aquí la variable controlada es la corriente de salida, que sí depende de L_f de forma directa a través del predictor, de modo que corregir su factor se traduce en seguimiento. Las dos curvas auxiliares muestran además el lazo interno de corriente de filtro, cuyo error acompaña al de la corriente de salida, comportamiento consistente con una mejora introducida por el predictor y no por un lazo externo adicional.

Las Figuras B.2(a) y B.2(b), trasladadas al Apéndice B, muestran los casos representativos. En isla, $K_{L_f} = 0.10$ reduce el error de 38.13 a 9.74 V. En red, $K_{L_f} = 0.50$ lo reduce de 12.16 a 7.13 A. Las formas de onda respaldan la diferencia de amplitud y la oscilación resumidas por las curvas anteriores.

5.5.4. Grupo G2, resonancia desplazada con impedancia conservada

La segunda familia mueve los dos parámetros en el mismo sentido y con el mismo factor, con lo que la impedancia característica se conserva y solo se desplaza la resonancia. Es también la dirección que separa con más claridad el comportamiento por debajo y por encima del nominal.

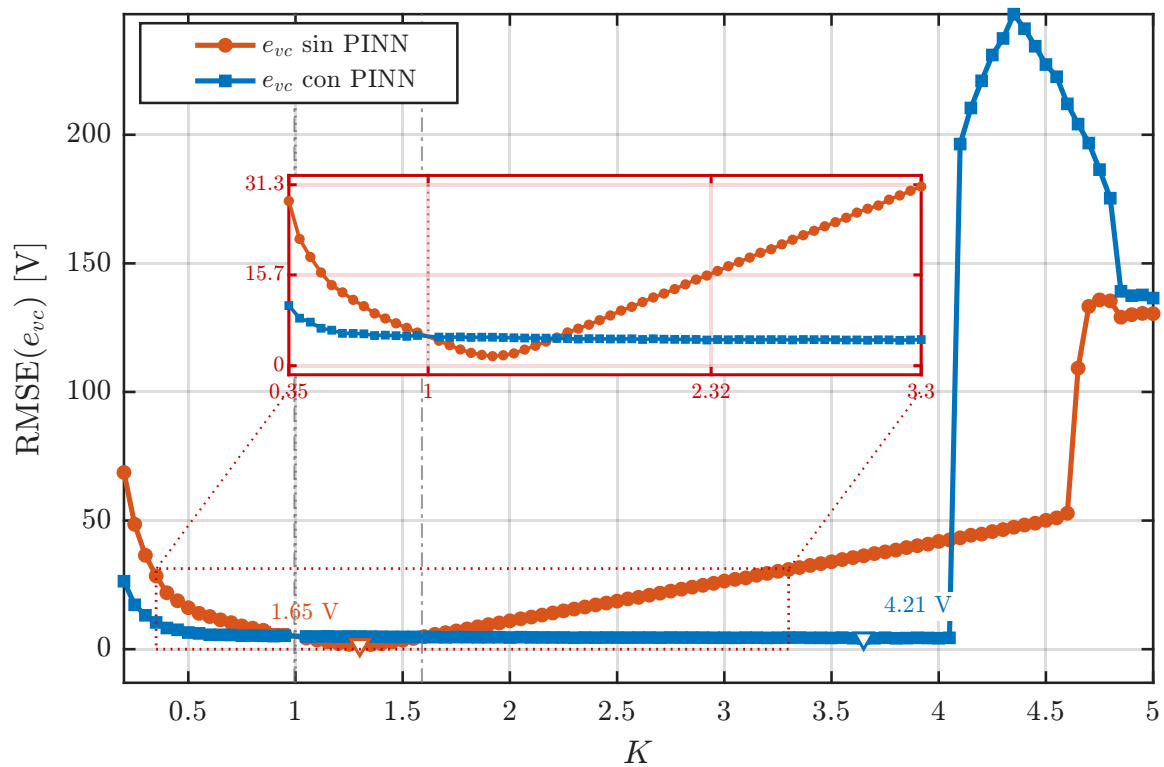


Figura 5.6. Escenario 1, grupo G2, variante directa, modo isla.

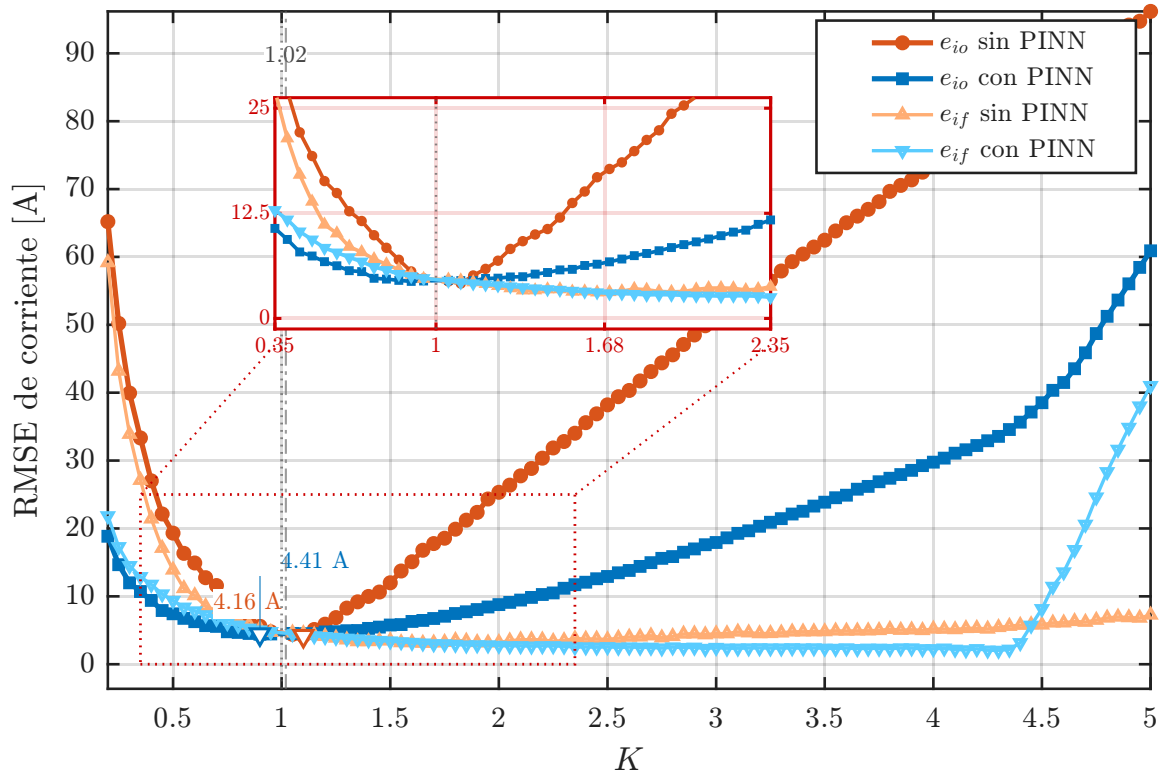


Figura 5.7. Escenario 1, grupo G2, variante directa, modo conectado a la red.

La Figura 5.6 reúne el mejor y el peor comportamiento del Escenario 1 en isla. Hasta $K = 4.05$ la corrección es sistemática, con una mediana del $+59.3\%$ sobre la familia completa, 23.73 V sin la PINN frente a 4.69 V con ella, y un máximo del $+89.9\%$ en $K = 4.00$. Desde $K = 4.10$ aumenta el RMSE con PINN. En cambio, $f_r < 0.60$ aparece en $K = 5.00$ con ella y no aparece sin ella, y la banda contigua $f_r \geq 0.95$ termina en $K = 4.70$ en ambos casos. Son indicadores del registro corto, distintos de la frontera manual de la Tabla 5.3. El índice solicitado de 0.670 antes del salto indica margen fundamental, no su causa dinámica.

La Figura 5.7 muestra que en modo conectado a la red la misma familia no presenta ninguna condición de colapso y la corrección es la más regular del escenario. La mediana vale $+60.9\%$, con 43.76 A sin la PINN frente a 14.81 A con ella, y de las ochenta condiciones supranominales setenta y ocho se clasifican como rescate, dos como neutras y ninguna como daño. El contraste con el modo isla de la figura anterior aísla el papel del lazo que forma tensión, que es el que pierde el control al degradarse el filtro, y no el de la identificación, que en los dos modos es la misma.

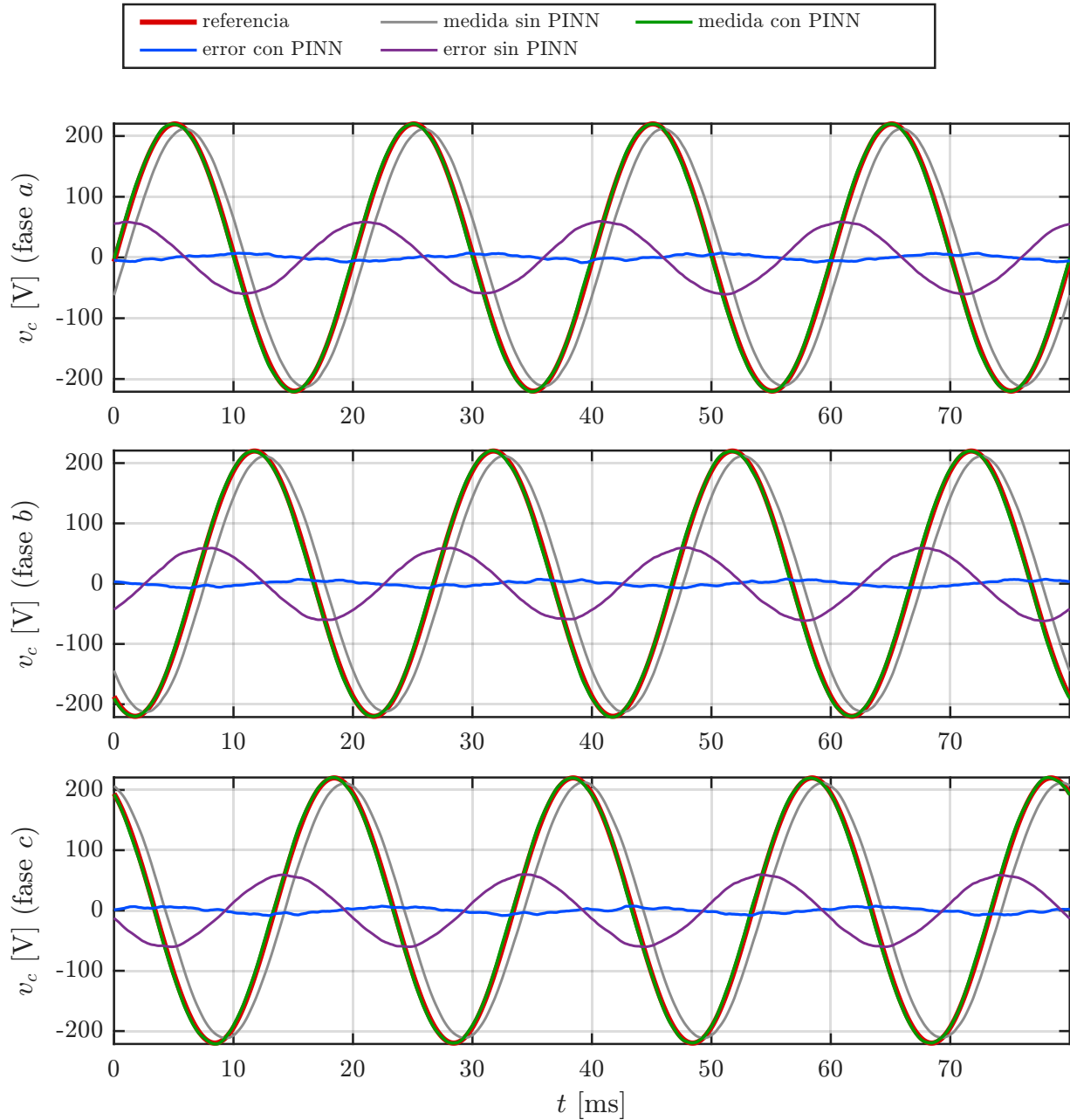


Figura 5.8. *Escenario 1, grupo G2, variante directa, forma de onda en modo isla, nivel de máxima mejora.*

La Figura 5.8 corresponde a $K = 4.00$, uno de los últimos niveles antes del colapso de la configuración con la PINN, con 41.90 V sin ella frente a 4.25 V con ella, un 89.9%. Es el punto de mayor mejora de todo el escenario en isla y a la vez el borde de su alcance, de modo que la onda muestra las dos cosas a la vez, un seguimiento casi exacto con la corrección y una tensión visiblemente degradada sin ella. Dos niveles más arriba, en $K = 4.10$, ya no admite esta lectura.

La forma de onda homóloga en red, Figura B.3(c) del Apéndice B, corresponde a $K = 0.70$ y reduce el error de 11.59 a 5.57 A. Se conserva como respaldo del residuo

asociado al desplazamiento de la resonancia, sin duplicar aquí la lectura de la curva.

5.5.5. Grupo G3, barrido axial de la capacitancia

La tercera familia es el barrido axial de la capacitancia, con la inductancia en su valor de diseño. La tensión del condensador es la magnitud que el maestro regula en isla y además la única que se mide de forma directa, de modo que es la dirección más favorable a la identificación.

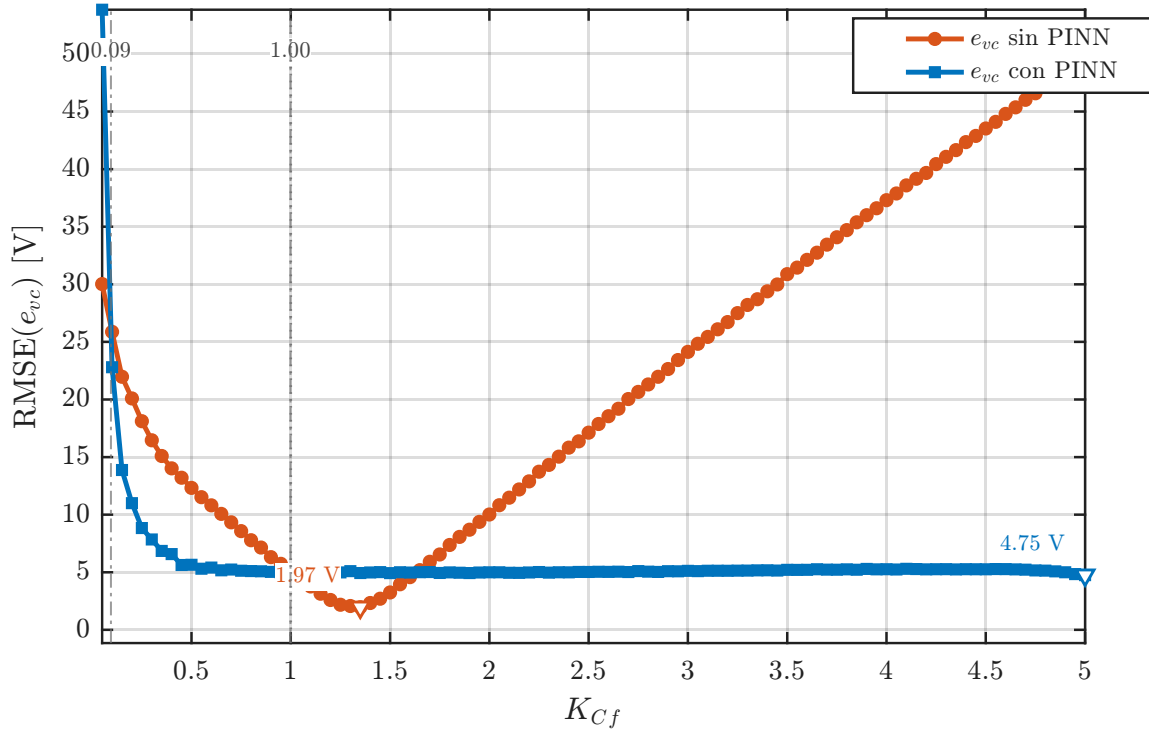


Figura 5.9. Escenario 1, grupo G3, variante directa, modo isla.

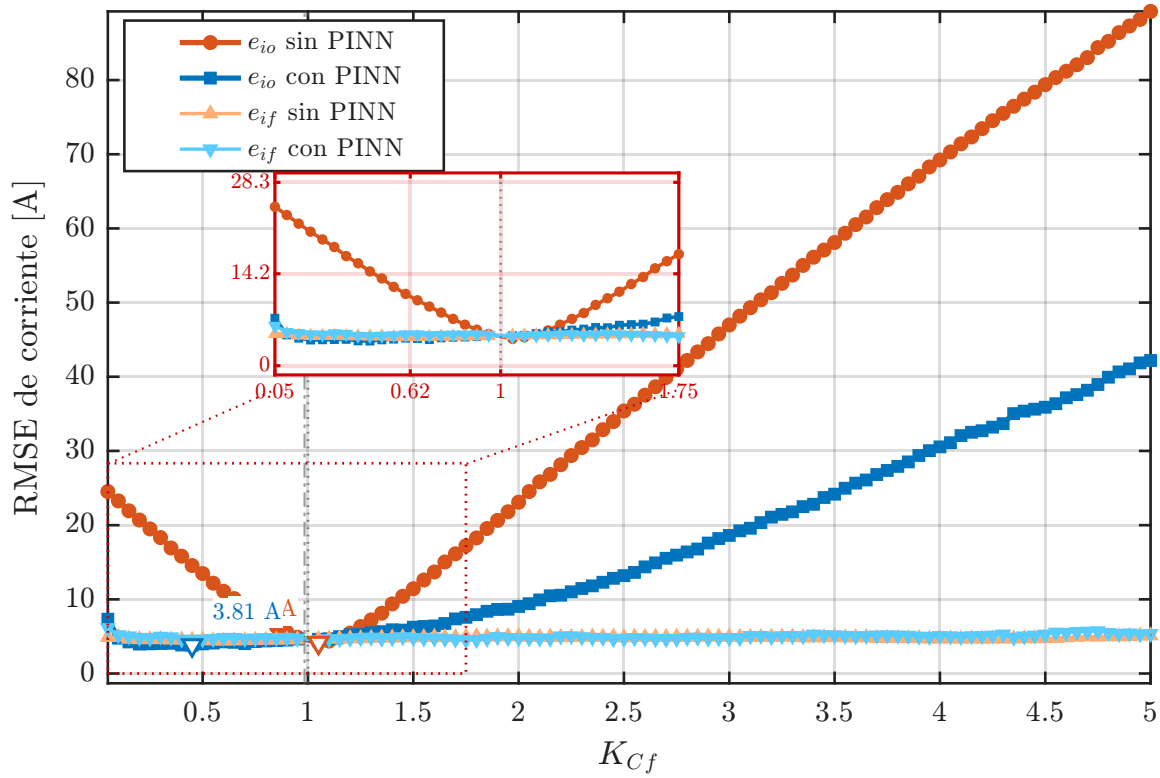


Figura 5.10. Escenario 1, grupo G3, variante directa, modo conectado a la red.

La Figura 5.9 muestra el barrido axial de la capacitancia, el caso donde la corrección rinde más en isla. La mediana vale +71.8 %, con 20.09 V sin la PINN frente a 5.13 V con ella, y el máximo del +90.4 % se alcanza en el extremo superior del barrido, $K = 5$. El resultado es coherente con la estructura del predictor de tensión, donde C_f entra a través del coeficiente b_c que multiplica la corriente de la rama capacitiva completa, de modo que un error en ese factor se propaga a la variable controlada sin atenuación. Es también el parámetro mejor identificado, según la Sección 5.5.8.

Hay sin embargo una banda estrecha, entre $K_{Cf} = 1.05$ y $K_{Cf} = 1.55$, donde la curva corregida queda por encima de la nominal y la clasificación marca daño. Conviene explicarla porque es el único tramo del grupo donde eso ocurre y admite una lectura precisa. La curva corregida es *plana* en todo ese intervalo, entre 4.93 y 5.10 V, y ese valor es justamente el error que el esquema entrega en la condición nominal, 5.01 V. La corrección está haciendo lo que debe, devolver a la planta perturbada el comportamiento de la planta nominal, y el resultado es el error nominal, ni más ni menos. Lo que se mueve es la otra curva. Sin corrección el error *baja* desde 5.05 V en el nominal hasta un mínimo de 1.97 V en $K_{Cf} = 1.35$, para volver a subir después.

La explicación es una cancelación parcial y no una mejora del control base. El predictor nominal arrastra en esta planta un residuo de régimen que no procede del desajuste, sino de la propia actuación por conjunto finito, que no consigue hacer coincidir exactamente la tensión del condensador con su referencia. Aumentar la capacitancia reduce el coeficiente $b_c = T_s/C_f$ con el que el predictor propaga la tensión, y en un entorno estrecho ese cambio compensa el residuo en lugar de sumarse a él. El mínimo de la curva sin corrección no

es robustez, es la coincidencia de dos errores de signo opuesto, y desaparece en cuanto el nivel se aleja de esa banda. Es el mismo tipo de fenómeno que el de la Sección 5.5.6, y merece la misma lectura, la comparación es válida pero el punto favorable al caso base es accidental.

En la Figura 5.10, la corrección en modo conectado a la red se mantiene alta y sin colapsos, con una mediana del +57.3 % y 36.30 A sin la PINN frente a 13.63 A con ella. Setenta y seis de las ochenta condiciones supranominales son rescate y ninguna es daño. La diferencia con el modo isla, catorce puntos porcentuales menos, procede de que aquí la capacitancia interviene sobre todo por la compensación de la corriente de rama en la referencia y no por el lazo que forma la tensión.

Las Figuras B.2(c) y B.2(d) del Apéndice B documentan los extremos representativos de G3. En isla, $K_{Cf} = 4.95$ reduce el error de 48.83 a 4.84 V. En red, $K_{Cf} = 0.20$ lo reduce de 20.69 a 3.97 A. Ambas ondas muestran la recuperación de amplitud y fase ya cuantificada por las curvas.

5.5.6. Grupo G4, resonancia fija con impedancia variable

La cuarta familia mueve los dos parámetros en sentidos opuestos y con factores recíprocos, de manera que la resonancia se conserva y la impedancia característica cambia. Es la dirección que agota el margen de tensión del convertidor, y por eso la que fija la frontera del escenario.

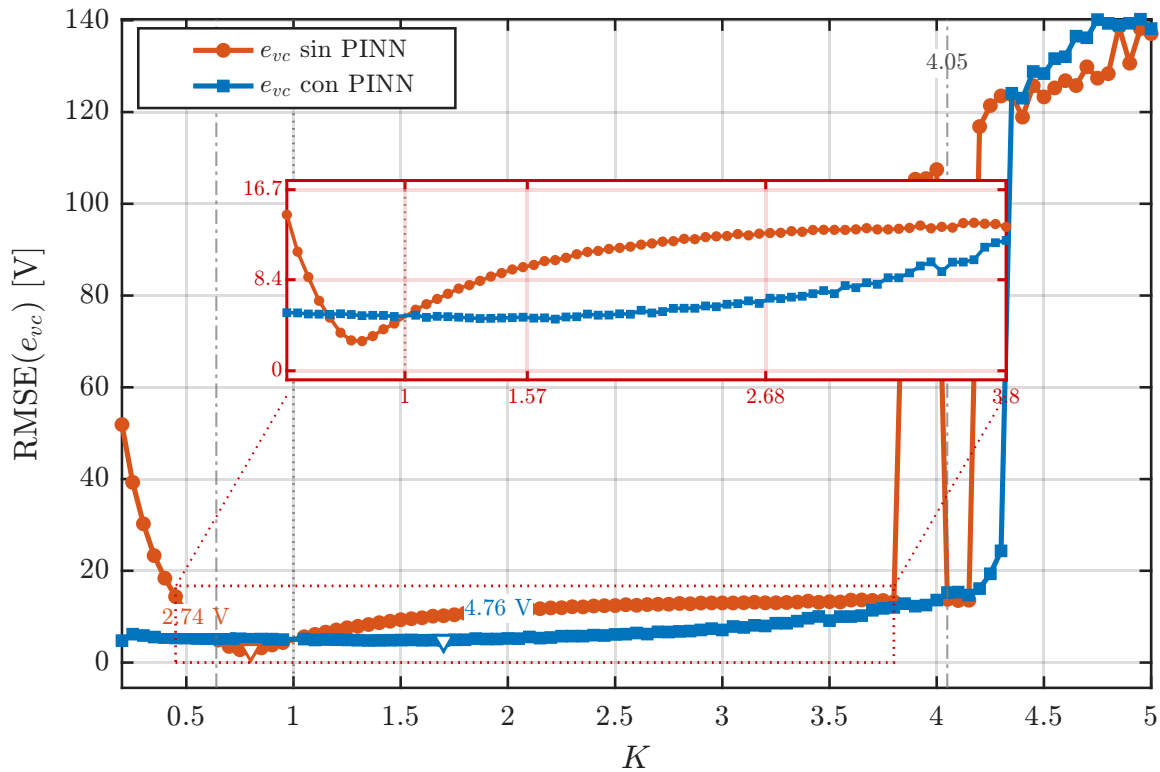


Figura 5.11. Escenario 1, grupo G4, variante directa, modo isla.

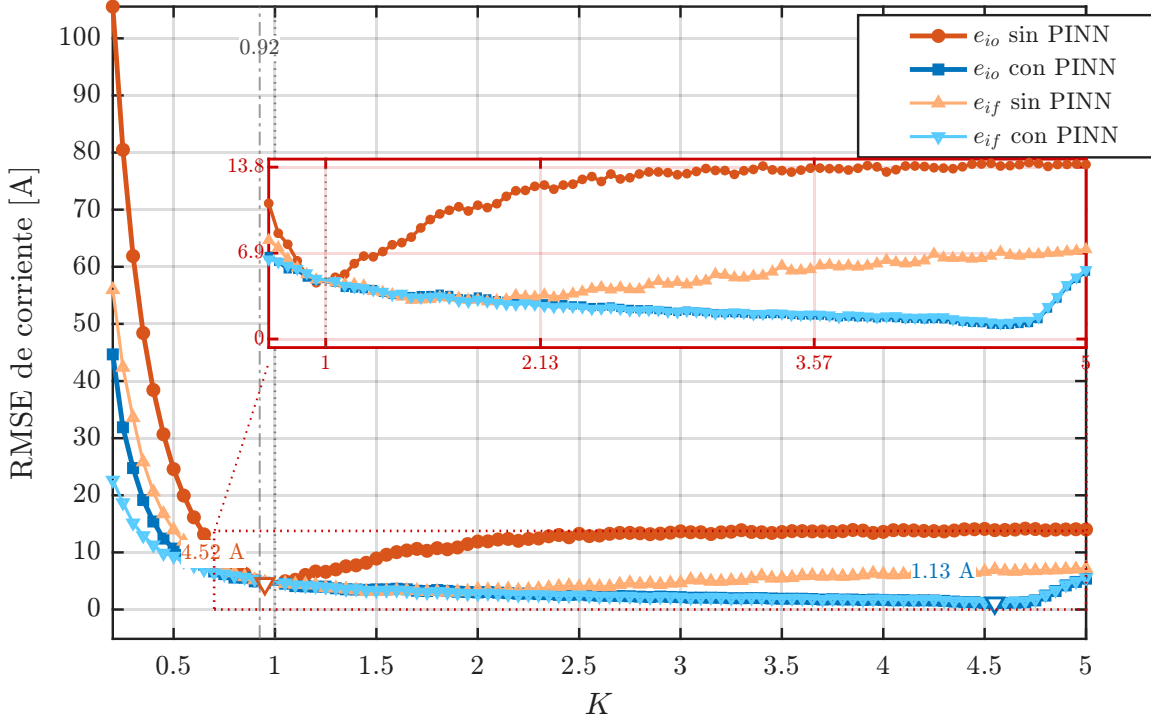


Figura 5.12. Escenario 1, grupo G4, variante directa, modo conectado a la red.

La Figura 5.11 recoge la variante directa en modo isla. La mediana de la mejora vale +41.6 %, con 12.99 V sin la PINN frente a 6.33 V con ella, y un mínimo del -85.7 % en $K = 0.80$. En el registro de un segundo, $f_r < 0.60$ aparece en $K = 3.85$ sin PINN y 4.35 con ella. La corregida ya abandona $f_r \geq 0.95$ en $K = 3.40$, aunque conserva una fundamental apreciable hasta 4.30.

Sin PINN, $f_r \geq 0.95$ reaparece en $K = 4.05$, 4.10 y 4.15 y se pierde desde 4.20. Son recuperaciones del registro corto, no una banda contigua. La frontera manual se recoge en la Tabla 5.3. En las 192 condiciones de G4, $K_{Lf}K_{Cf} = 1$ con desviación máxima 3.6×10^{-15} , y la frecuencia natural permanece en 129.949 Hz, con recorrido relativo 7.7×10^{-15} . Su desplazamiento no puede explicar la alternancia.

Sí cambia $Z_0 = \sqrt{L_f/C_f}$, entre 0.490 y 12.247 Ω , un factor veinticinco. Con $R_{fc,m}$ fija, su contribución al amortiguamiento es

$$\zeta_c = \frac{R_{fc,m}}{2Z_0} = \frac{R_{fc,m}}{2} \sqrt{\frac{C_f}{L_f}}, \quad (5.26)$$

y cae de 0.510 a 0.020, también un factor veinticinco. ζ_c corresponde al par LC aislado, no al amortiguamiento modal del sistema controlado. Se demuestran la invariancia de $L_f C_f$ y los cambios de Z_0 y ζ_c , mientras las recuperaciones solo acreditan una respuesta no monótona en la ventana. Atribuir las a fase, condiciones iniciales o polos exigiría aislar esos mecanismos. La cota de tensión limita el seguimiento solicitado, no prueba divergencia asintótica.

La Figura 5.12 muestra que en modo conectado a la red la misma familia entrega el

mejor resultado del escenario, con una mediana del +79.9 % y 13.43 A sin la PINN frente a 2.59 A con ella. De las ochenta condiciones supranominales setenta y nueve son rescate, una es neutra y ninguna es daño, y no hay colapsos. El contraste con la figura anterior delimita con precisión el alcance del resultado, la corrección paramétrica funciona mientras el convertidor disponga de tensión, y la frontera de la familia la impone el puente, no la identificación.

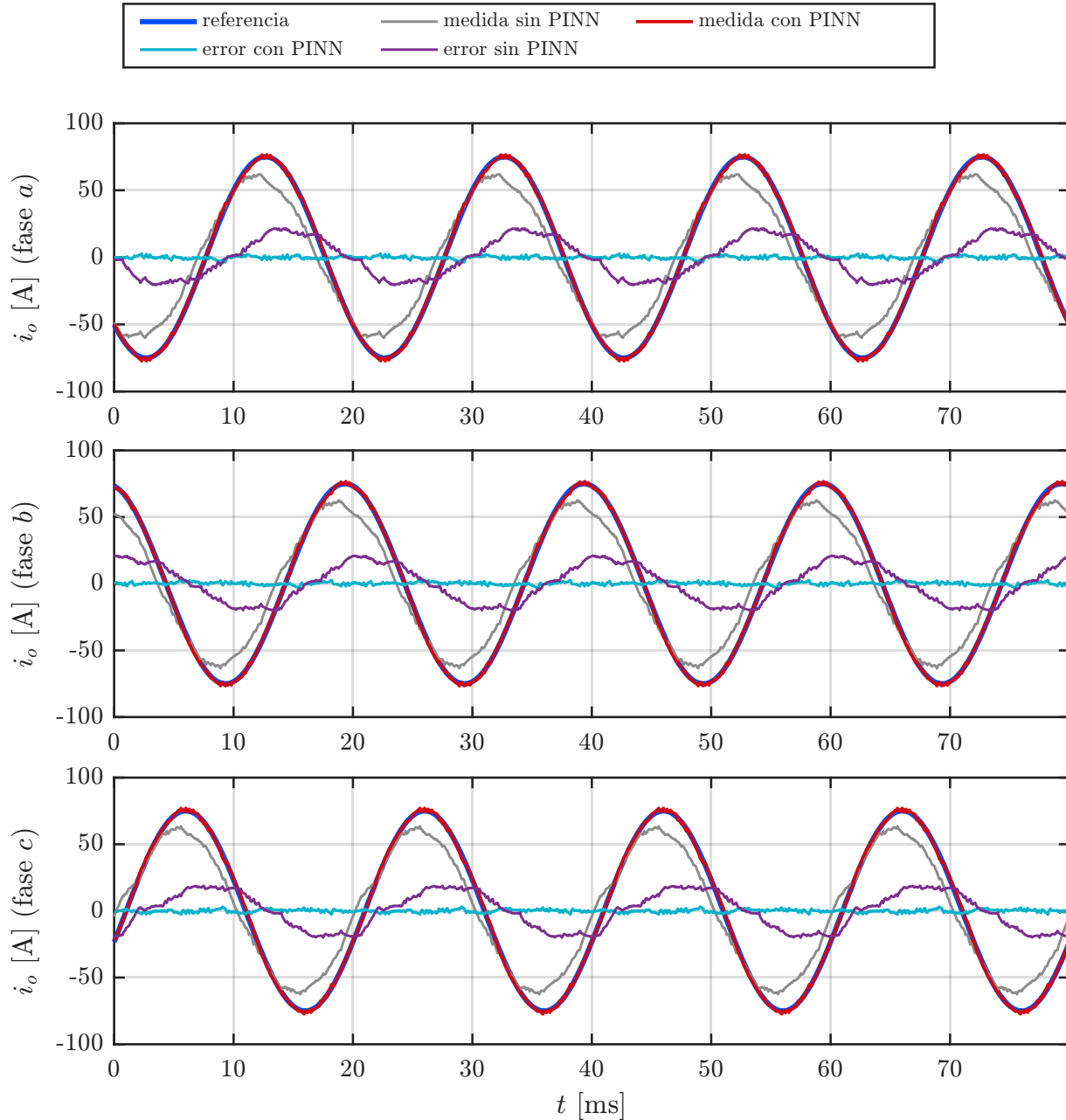


Figura 5.13. Escenario 1, grupo $G4$, variante directa, forma de onda en modo conectado a la red.

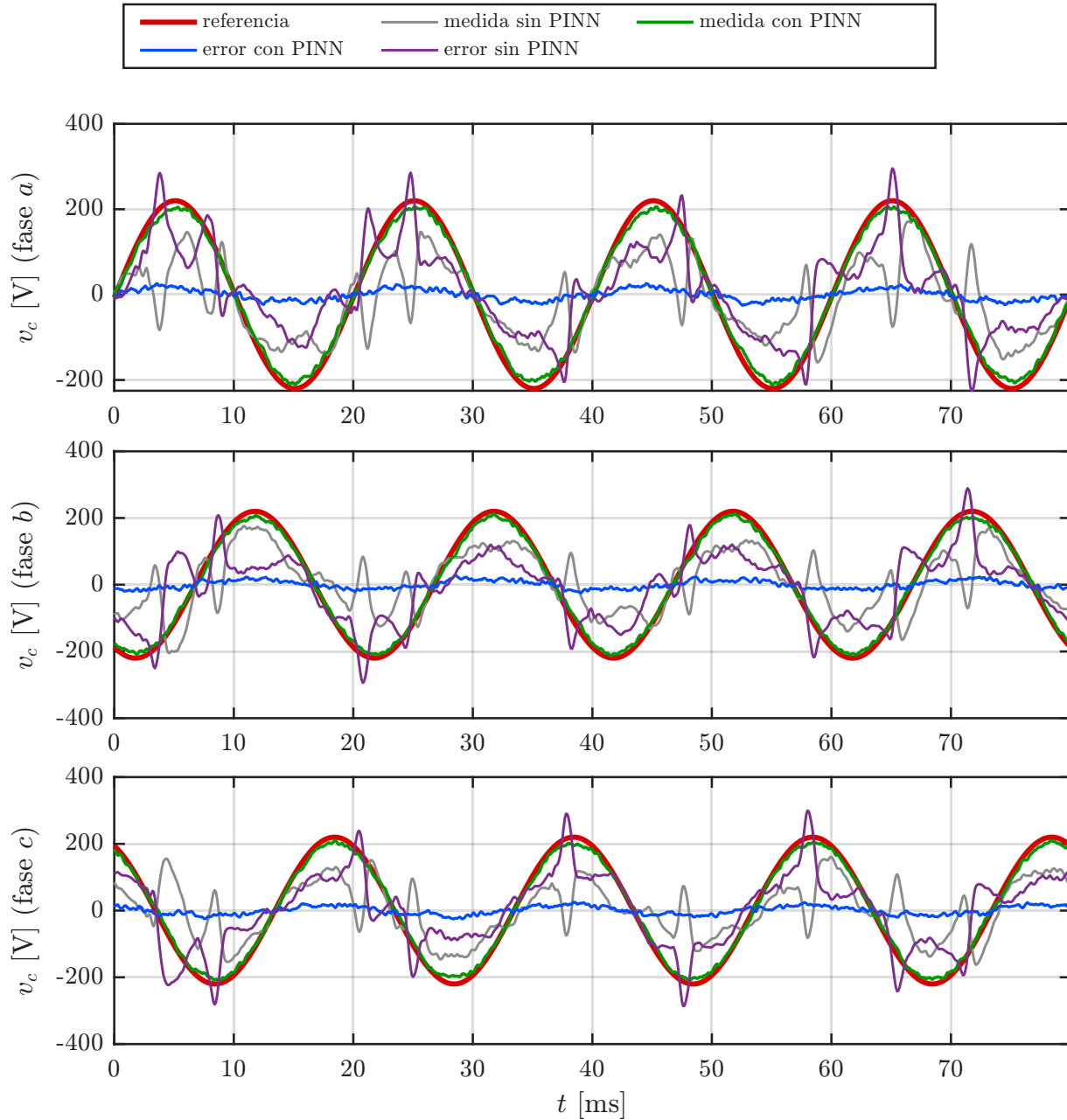


Figura 5.14. Escenario 1, grupo $G4$, variante directa, forma de onda en modo isla, nivel de máxima mejora.

La Figura 5.13 traslada ese resultado al dominio del tiempo. La corriente de salida sin corrección queda por debajo de su referencia y con un desfase visible, porque el predictor calcula con una inductancia que no es la de la planta y el conjunto finito no dispone de ningún lazo que cierre ese error en régimen. Con la corrección las dos trazas se superponen. La diferencia entre ambas es directamente el error paramétrico que la identificación recupera, y es la razón de que este sea el mejor caso del escenario.

La Figura 5.14 corresponde a $K = 3.90$, con 105.36 V sin la PINN frente a 12.30 V con ella, un 88.3%. El nivel elegido está en la rama supranominal, justo por debajo de

la frontera de la familia, y muestra el caso más elocuente del escenario en isla, la tensión formada perdida por completo sin corrección y recuperada con ella. Conservar la resonancia mientras la impedancia característica crece exige del puente una tensión que sin identificar el filtro no llega a sintetizarse, y el defecto aparece como pérdida de amplitud además de como *ripple* sobre la tensión formada.

La Figura B.7(a) del Apéndice B muestra $K = 4.55$ en red, donde el error de corriente baja de 13.89 a 1.13 A. Su contraste con isla distingue seguimiento de corriente y formación de tensión.

5.5.7. Grupo G5, escenarios no correlacionados

El último grupo abandona la geometría de las cuatro rectas y toma cien combinaciones no correlacionadas de los dos factores, para comprobar que el resultado no depende de que la perturbación siga una dirección privilegiada del plano. Como no admiten un nivel único, se evalúan frente a la severidad $\sigma(\mathbf{K}) = \exp \max_j |\ln K_j|$, que vale la unidad en el nominal.

En isla, la mejora mediana es +55.8%, con ochenta y cinco rescates, ocho neutros y siete daños. En red alcanza +66.8%, con noventa y ocho rescates de cien condiciones. Esta mayor homogeneidad respalda la corrección al seguir corriente en las direcciones muestreadas. G5 no define una frontera única, pues combina factores independientes y una misma severidad puede ocupar regiones distintas. La Figura B.8 del Apéndice B conserva las dispersiones y ondas de máxima mejora: 44.88 a 4.97 V en isla y 13.08 a 3.89 A en red.

5.5.8. Calidad de la identificación

Las subsecciones anteriores miden lo que la corrección consigue en lazo cerrado. Esta mide algo distinto, si los factores que la PINN entrega se parecen a los que la planta tiene. Son dos preguntas separadas, y la respuesta a la segunda no se deduce de la primera.

Tabla 5.8

ESCENARIO 1. ERROR DE IDENTIFICACIÓN $|\ln(\rho/K)|$ Y SESGO ρ/K POR GRUPO Y MODO.

Grupo	Modo	$ \ln(\rho/K) $ [%]		sesgo ρ/K	
		L_f	C_f	L_f	C_f
G1	isla	4.5	2.6	0.991	0.978
G1	red	5.4	0.8	0.985	0.998
G2	isla	2.9	1.7	0.997	1.001
G2	red	5.6	1.6	0.963	1.009
G3	isla	2.3	2.0	1.024	1.013
G3	red	0.8	2.1	0.995	1.016
G4	isla	4.1	6.5	0.989	0.941
G4	red	4.9	3.2	0.993	0.989
G5	isla	3.2	6.4	1.019	1.056
G5	red	5.5	3.2	1.020	1.011
global	—	3.5	2.3	—	—

De la Tabla 5.8 se siguen cuatro lecturas, y las cuatro se sostienen sobre la comparación entre columnas y no sobre una cifra aislada.

La primera es el orden global. Sobre las diez combinaciones de familia y modo el error mediano de identificación vale 3.0 % en la inductancia y 2.8 % en la capacitancia en modo isla, y 4.2 y 1.8 % en modo conectado a la red. **La identificación es buena en los dos modos y la diferencia entre ellos es de poco más de un punto porcentual**, con la capacitancia algo mejor resuelta en modo conectado a la red y la inductancia algo mejor en isla. La diferencia es compatible con la excitación de corriente en red y de tensión en isla. No se aisló su contribución ni se cuantificó una equivalencia entre riqueza espectral e información identificable.

La segunda es que **cada parámetro se identifica mejor cuando la perturbación no lo mueve**. En G1, que solo perturba la inductancia, el error de la capacitancia baja a 2.6 % mientras el de la inductancia sube a 4.5 %. En G3, que solo perturba la capacitancia, el orden se invierte, 2.3 frente a 2.0 %, aunque con un margen mucho más estrecho. No es un artefacto, es la definición del problema, confirmar un valor nominal es más fácil que estimar uno desplazado.

La tercera es el signo del sesgo. La mediana de $\ln(\rho/K)$ es **negativa en la inductancia en siete de las diez combinaciones**, con valores entre -0.3 y -3.8 %, de modo que la PINN tiende a subestimar el factor aplicado. La consecuencia es conservadora, un ρ_{Lf} menor que el real deja el coeficiente b_i del predictor por encima de su valor exacto y el lazo pide algo menos de tensión de la que necesitaría con el valor correcto. En la capacitancia el signo no es sistemático, va de -6.1 a $+5.4$ %.

La cuarta es la dispersión, que la mediana oculta. El percentil noventa del error casi cuadruplica a la mediana en G1 en isla, 16.1 frente a 4.5 %, mientras en G2 la distribución es mucho más compacta, 5.0 frente a 2.9 %. Ese tercio superior corresponde a los niveles extremos del barrido, donde el factor aplicado se acerca a los bordes de la banda entrenada. Es coherente con la envolvente de validez de la Sección 5.1.6 y no con un fallo de la identificación en el rango declarado.

El grupo G5 es el más exigente de los cinco en la capacitancia, con 6.4 % en isla, y aun así se mantiene por debajo del siete por ciento. Es el único que combina dos factores independientes, de modo que su resultado acota lo que cabe esperar fuera de las cuatro direcciones muestreadas.

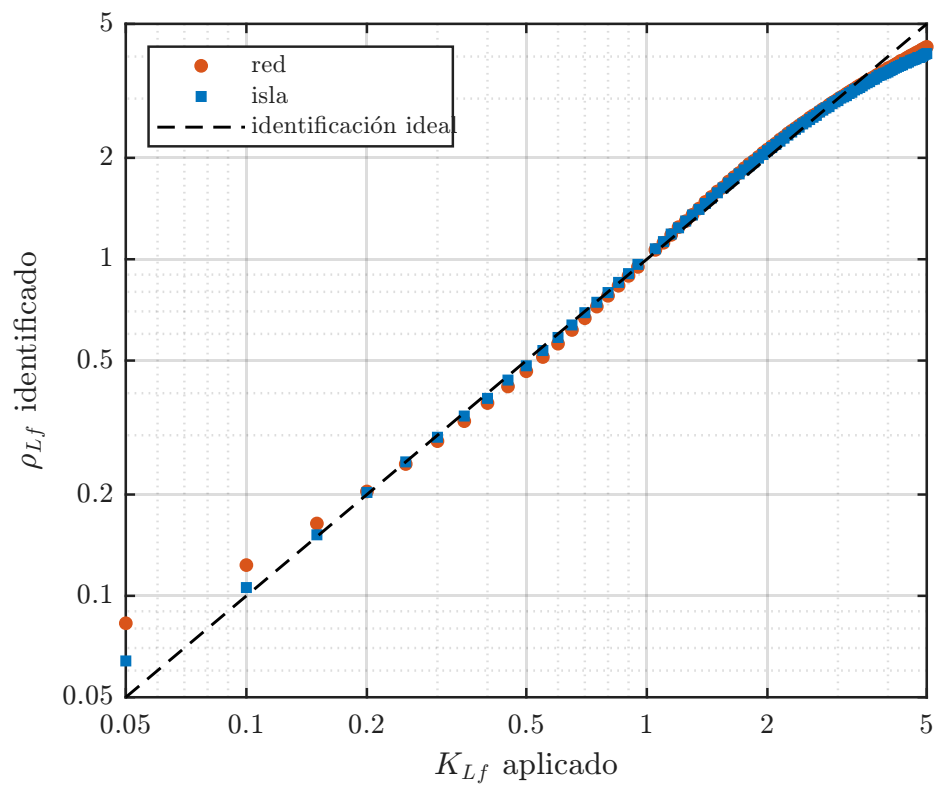


Figura 5.15. Escenario 1, factor de inductancia identificado frente al aplicado.

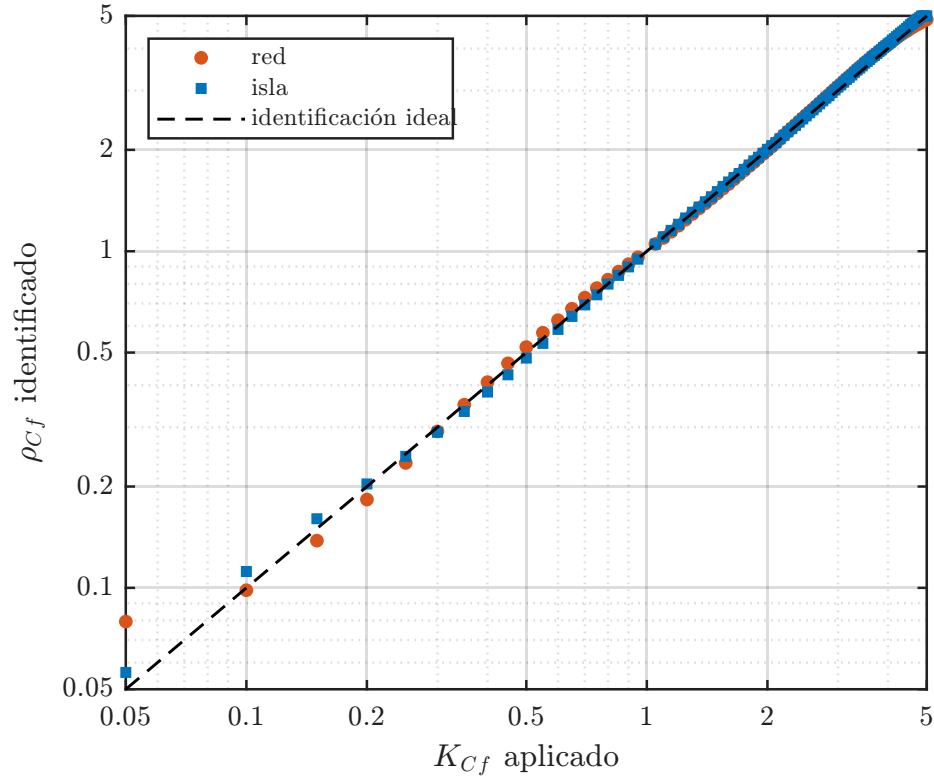


Figura 5.16. Escenario 1, factor de capacitancia identificado frente al aplicado.

La identificación se lee mejor por parámetro que por familia. La capacitancia se identifica mejor que la inductancia en las familias que la perturban de forma directa, con un error mediano del 2.6 % en G1 frente al 4.5 % de la inductancia en isla, y el orden se invierte en G4 y G5, donde el error de la capacitancia sube al 6.5 y al 6.4 %. El patrón es el esperado, cada parámetro se identifica mejor cuando la perturbación no lo mueve, porque entonces la PINN solo tiene que confirmar el valor nominal. El resultado relevante es que **el error se mantiene por debajo del siete por ciento en las diez combinaciones**, incluida la de escenarios no correlacionados, que es la más exigente.

Las Figuras 5.15 y 5.16 entregan una mediana del error de identificación de 3.5 % para la inductancia y 2.3 % para la capacitancia.

Estas dos cifras, enfrentadas a los 6.9 y 4.2 % del esquema modulado, constituyen el resultado transversal de esta memoria, y dentro de este trabajo es la primera medición de las dos identificaciones sobre una rejilla idéntica y con el mismo postproceso. Evaluadas sobre las medianas antes de redondear, las razones valen 2.00 para la inductancia y 1.85 para la capacitancia, mientras la razón entre periodos de muestreo es $T_{s,2}/T_{s,1} = 214.59/100 = 2.146$. **Las tres quedan en el entorno de dos**, con desviaciones del 7 y del 14 % respecto de la razón de periodos.

Procede declarar el estatus de esa coincidencia con precisión. Es una *concordancia numérica aproximada* medida sobre dos escenarios, no una relación causal demostrada, y el margen del quince por ciento en la capacitancia obliga a no forzarla más allá de eso. Establecerla como causal exigiría una ablación que variase el periodo de muestreo dejando fijos el modulador, los lazos complementarios y la síntesis de la actuación, y esa ablación

no forma parte de esta campaña. Lo que sí queda establecido es el hecho medido, que bajo igual esfuerzo de conmutación el esquema modulado identifica con aproximadamente el doble de error.

El *signo* del sesgo también se comporta de forma distinta. En el esquema modulado la PINN subestima la inductancia de forma sistemática en isla, con razones ρ_{Lf}/K_{Lf} entre 0.81 y 1.00. En el conjunto finito el sesgo es mucho menor y no es sistemático, las razones de la Tabla 5.8 se reparten entre 0.94 y 1.02 a ambos lados de la unidad. La identificación del conjunto finito no solo es más exacta, además está centrada.

La separación por rama es necesaria porque la mediana global de una familia acoplada promedia dos regímenes físicamente distintos. Las cuatro familias muestran el mismo signo de la corrección en las dos ramas, pero magnitudes que difieren hasta en treinta y ocho puntos porcentuales, como ocurre en G1 en isla, donde la rama subnominal da +30.4 % y la supranominal -7.8 %. Leer solo la mediana global de esa familia llevaría a concluir que la corrección no sirve, cuando lo que ocurre es que sirve en una mitad del recorrido y no en la otra.

5.5.9. Contraste del límite de tensión con la campaña

Las Figuras B.6(a) y B.6(b), trasladadas al Apéndice B, delimitan hasta dónde se sostiene la corrección. La PINN se ajustó sobre $\rho \in [0.05; 5]$, pero la compensación efectiva termina antes en las familias acopladas porque el convertidor agota la tensión disponible, diferencia que formaliza la Sección 5.1.6. Los dos índices están normalizados por el límite propio de este escenario, $V_{dc}/\sqrt{3}$.

En el registro corto corregido, el índice solicitado cruza uno en $K = 4.15$ y la fundamental cae bajo 0.90 en $K = 4.25$. La predicción es 4.375, mientras la frontera manual con PINN es $[4.25, 4.30]$ (Tabla 5.3). El umbral 0.90 indica deterioro y difiere del 0.60 de la tabla maestra. El caso modulado se analiza en la Sección 5.6.9.

5.6. Escenario 2, MPC modulado

Esta sección repite sobre el esquema modulado la campaña que la anterior ejecutó sobre el conjunto finito, con la misma planta, los mismos grupos de perturbación y los mismos criterios de clasificación, de modo que la comparación entre ambas es directa familia por familia.

5.6.1. Diseño de la campaña y resolución del barrido

La campaña recorre el espacio de perturbación descrito en el Capítulo 4 mediante una rejilla que conserva su geometría y resuelve de manera uniforme las fronteras de interés.

El primero es la rejilla. Los niveles pasan de una progresión logarítmica de 41 puntos por variante a una rejilla *lineal uniforme* de paso 0.05. El motivo es de lectura, no de cobertura. Las figuras del capítulo usan eje lineal, y sobre ese eje una rejilla logarítmica acumula puntos junto al nominal y los rarifica en los extremos, que es precisamente donde ocurren los colapsos que interesa resolver. Con paso constante la frontera de divergencia queda determinada con una incertidumbre de 0.05 en todo el recorrido.

La rejilla lineal recorre la recta completa en un solo barrido, de modo que cada familia produce una única curva por modo y no hacen falta dos conjuntos de simulaciones. Esa rejilla es uniforme en K , con paso 0.05, pero reparte los niveles de forma asimétrica sobre la figura, porque la rama subnominal ocupa menos de un quinto del ancho. Las curvas que lo requieren incorporan por eso una ampliación de la región comprimida dentro de la propia figura, con la zona ampliada marcada sobre el eje principal, en lugar de duplicar la figura con un cambio de índice.

Conviene cuantificar esa asimetría, porque es la que justifica la ampliación. El barrido uniforme sitúa diecisiete niveles en el intervalo $[0.20; 1]$ y ochenta y uno en $[1; 5]$, de modo que sobre el eje lineal la rama subnominal ocupa menos de un quinto del ancho de la figura. Reindexar por $1/K$ invertiría la compresión y resolvería esa rama, pero al coste de duplicar cada figura y de obligar al lector a cambiar de eje entre una vista y la otra. La ampliación incrustada consigue la misma resolución sin salir de la figura, y por eso es la solución adoptada.

El resultado es de 491 escenarios y 1964 corridas, dos modos de operación por dos configuraciones de control, todas terminadas en estado válido. La planta mantiene $K_{Rfc} = 1$ y $K_{Rf} = 1$ en la totalidad de la campaña, de modo que la perturbación recae solo sobre los dos parámetros que la PINN identifica.

La temporización es la de la configuración de comparación justa, portadora de 2330 Hz igual a la frecuencia de conmutación efectiva medida del conjunto finito, doble actualización con $T_s = 214.59 \mu s$ y lazo de tensión con $K_v = 0.466$ y $K_{iv} = 50$.

5.6.2. Caso nominal y clasificación por régimen

Igual que en el escenario anterior, el caso sin perturbación fija el suelo de error y el criterio de clasificación. Aquí interesa además compararlo con el del conjunto finito, porque los dos esquemas no parten del mismo punto y esa diferencia condiciona todo lo que sigue.

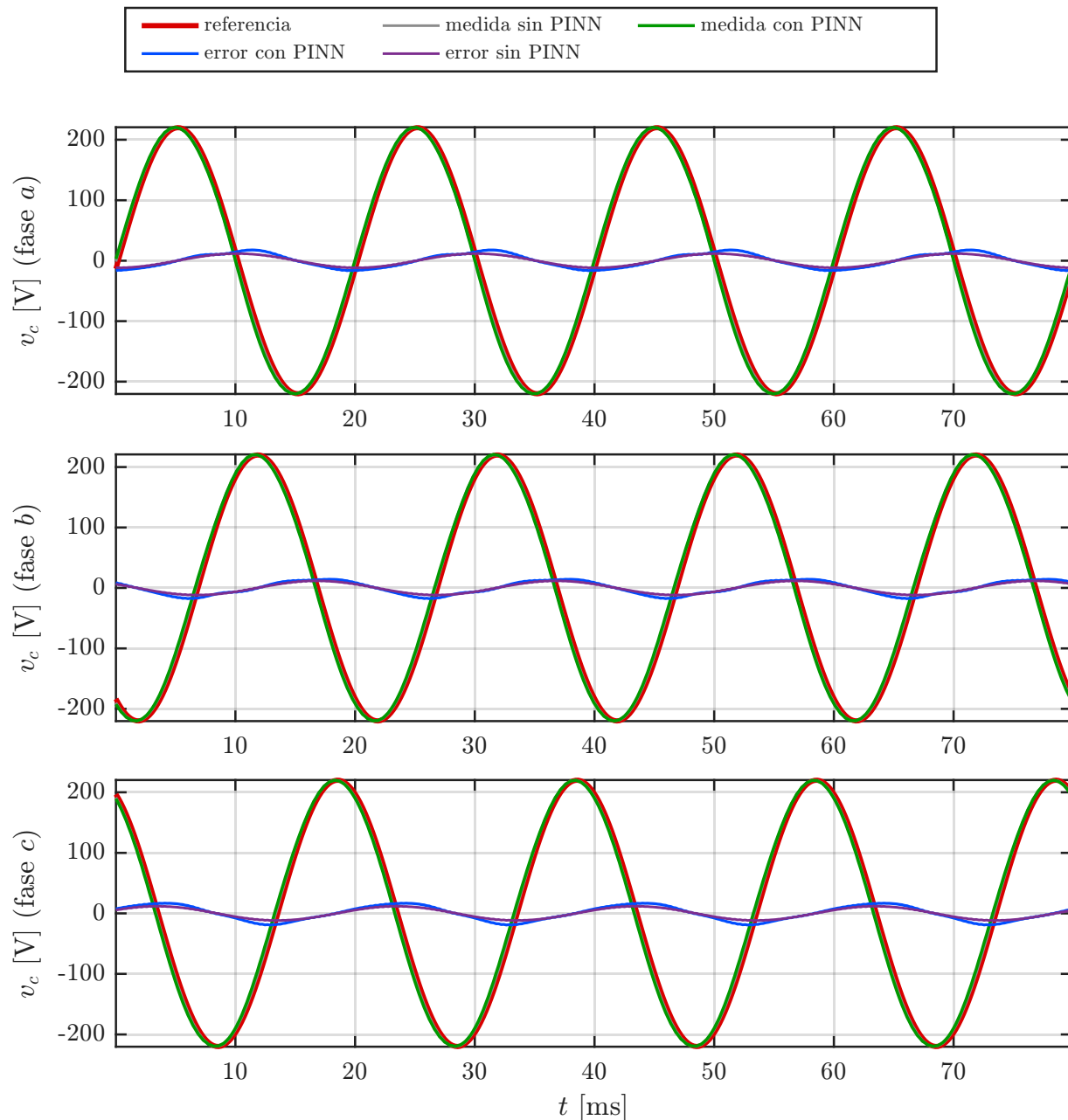


Figura 5.17. Caso nominal en modo isla.

La Figura 5.17, igual que su homóloga del Escenario 1, fija el piso de error con el que se leen las curvas siguientes. La diferencia con aquel escenario es el origen del piso, que aquí no procede de un espectro de conmutación disperso sino del *ripple* concentrado en la portadora del modulador. **La comparación de magnitudes entre escenarios se separa por modo.** En modo conectado a la red el piso del modulado es menor, 3.64 frente a 4.31 A, y el umbral de sensibilidad recorta por ello una fracción mayor de las diferencias medidas. En isla, en cambio, es mayor, 8.29 frente a 4.70 V, porque allí la tensión formada se construye a partir de una referencia que el lazo externo corrige a la escala del periodo de modulación y el *ripple* de la portadora la alcanza sin filtrar.

En el punto nominal las trazas con y sin identificación se superponen a la referencia en las tres fases. El error de régimen pasa de 8.29 a 11.34 V en isla y de 3.64 a 3.71 A en modo conectado a la red. La corrección empeora el seguimiento en los dos modos, de forma marginal en red, 0.07 A, y de forma apreciable en isla, 3.06 V, lo cual es coherente y queda declarado, porque en $K = 1$ no hay ningún desajuste que corregir y la corrección solo puede añadir error. **Ese coste en el punto nominal es el precio de la corrección donde no hace falta**, y acota por abajo lo que cabe esperar de ella en las condiciones de perturbación leve. La forma de onda nominal en red se conserva en la Figura B.1(b) del Apéndice B.

Tabla 5.9

ESCENARIO 2. MEDIANA DEL ERROR DE RÉGIMEN Y CLASIFICACIÓN POR GRUPO Y MODO, CON UMBRAL DE $\pm 5\%$ Y PISO DE SENSIBILIDAD.

Grupo	Modo	n	RMSE sin	RMSE con	mejora	resc.	neut.	daño
G1	isla	99	10.99	8.66	+7.8	51	3	45
G1	red	99	3.61	3.70	-2.2	23	76	0
G2	isla	96	88.03	11.36	+80.9	91	0	5
G2	red	96	33.64	9.72	+60.5	70	24	2
G3	isla	99	71.04	9.55	+86.0	91	2	6
G3	red	99	16.53	3.79	+73.8	63	34	2
G4	isla	96	36.06	9.31	+67.3	61	5	30
G4	red	96	3.65	3.70	-0.7	7	60	29
G5	isla	100	71.34	12.17	+71.7	77	4	19
G5	red	100	38.65	4.80	+73.8	67	27	6
NOM	isla	1	8.29	11.34	-36.9		-	
NOM	red	1	3.64	3.71	-1.7		-	

La Tabla 5.9 recoge el resultado por grupo y modo con el mismo formato que la Tabla 5.7, de modo que ambas campañas se leen una contra otra. Al umbral relativo se añade un *piso de sensibilidad*, cuya necesidad se ve mejor con un caso concreto. En modo conectado a la red el error de régimen del barrido axial de inductancia vale 3.61 A sin identificación, y el del punto nominal 3.64 A. Coinciden porque en ese grupo y ese modo la perturbación no degrada el lazo de corriente, cuyo error ya está en el *ripple* del modulador. Aplicar ahí un umbral relativo del cinco por ciento convierte diferencias de 0.15 A en daño declarado. El piso resuelve el problema sin introducir arbitrariedad, una condición cuya diferencia absoluta no alcanza 0.5 A en corriente o 0.5 V en tensión se cuenta como neutra sea cual sea el porcentaje.

El efecto del piso está acotado y es asimétrico, que es la señal de que actúa donde debe. Neutraliza tres de los cuarenta y dos casos de daño en modo conectado a la red y ninguno de los ciento seis en isla, y **no reclasifica ni un solo rescate**. Que en isla no neutralice nada es coherente con lo que allí se mide, porque la variable controlada es la tensión y sus diferencias absolutas superan con holgura el piso incluso donde la corrección perjudica. Donde la identificación aporta, la diferencia absoluta es siempre mucho mayor que el piso.

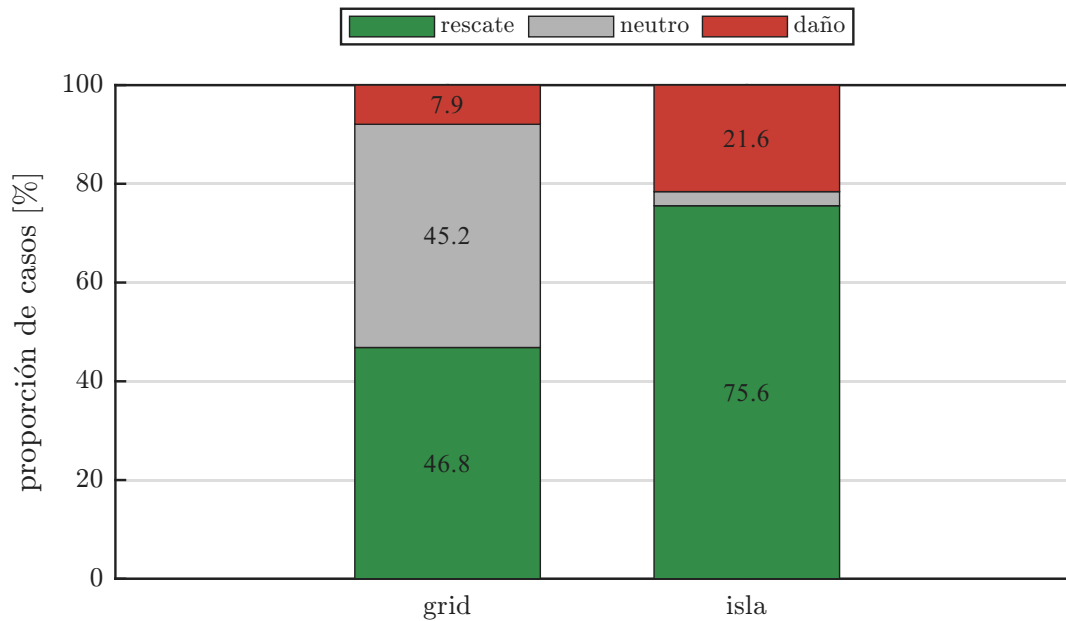


Figura 5.18. Reparto de regímenes por modo de operación, umbral de $\pm 5\%$ con piso de sensibilidad.

La Figura 5.18 resume los 982 pares condición–modo. El reparto queda en 46.8 % de rescate, 45.2 % de neutro y 7.9 % de daño en modo conectado a la red, y en 75.6 %, 2.9 % y 21.6 % en isla. La diferencia entre los dos modos es estructural y no de calidad de la identificación. En isla la variable controlada es la tensión de condensador, que depende directamente de los dos parámetros perturbados. En modo conectado a la red lo es la corriente de salida, cuyo lazo incorpora un integrador en marco sincrónico que anula el error de régimen con independencia del modelo, de modo que no queda margen que recuperar. De hecho 221 de las 491 condiciones de ese modo quedan por debajo del piso de sensibilidad.

5.6.3. Grupo G1, barrido axial de la inductancia

La misma familia axial de inductancia, ahora sobre el esquema modulado. La comparación con su homóloga del conjunto finito es el resultado que interesa, porque las dos campañas comparten planta, carga y niveles, y solo difieren en el controlador.

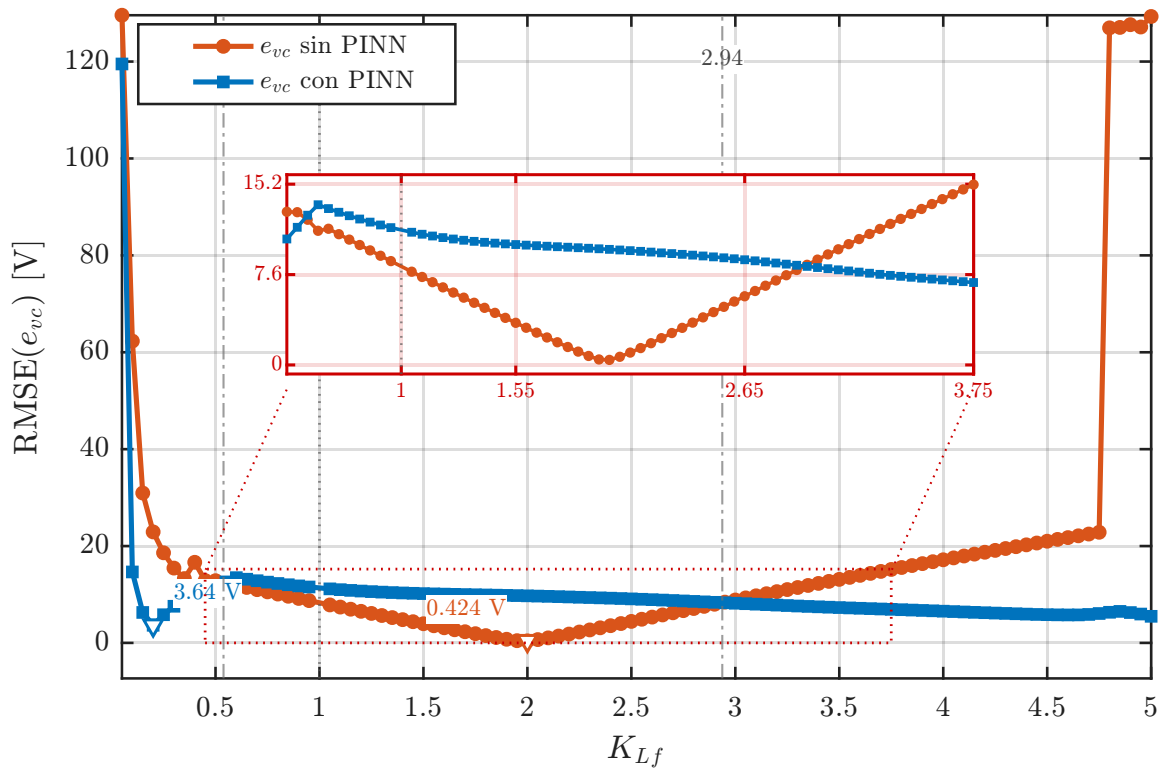


Figura 5.19. Grupo G1, barrido axial de L_f , variante directa, modo isla.

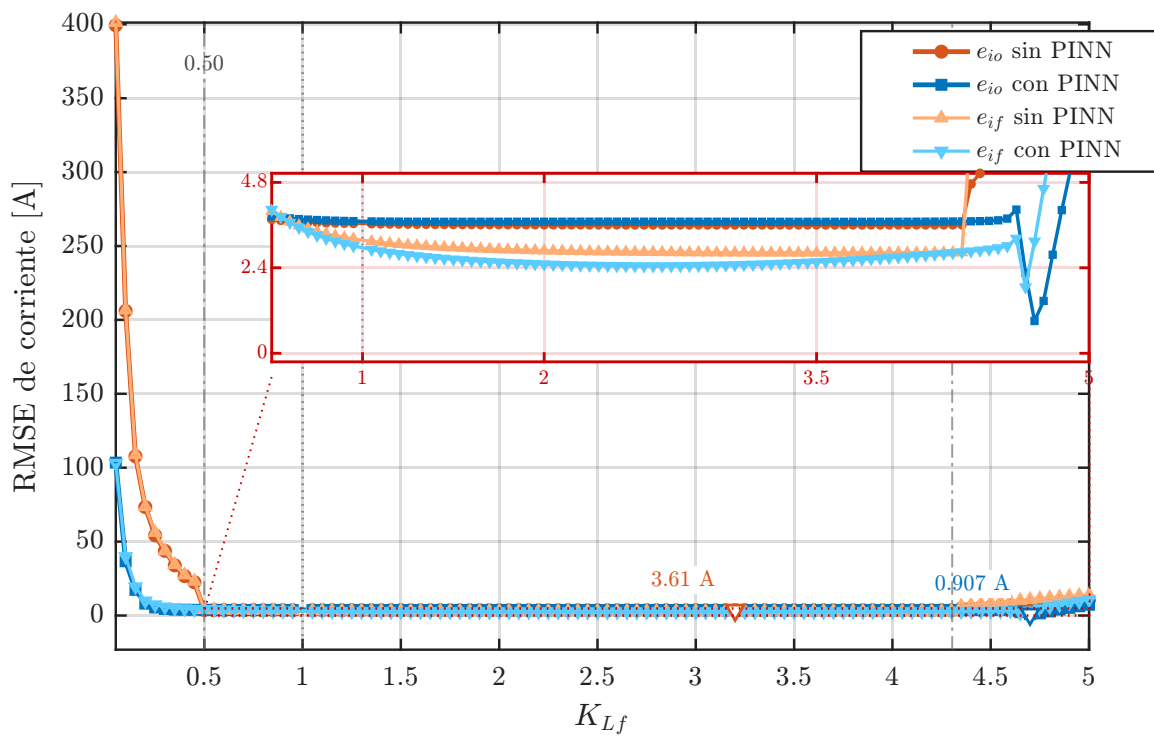


Figura 5.20. Grupo G1, barrido axial de L_f , variante directa, modo conectado a la red.

La Figura 5.19 muestra que el barrido axial de la inductancia en el modulado invierte el signo del resultado del conjunto finito. La mediana de la mejora vale $+7.8\%$, con 10.99 V sin la PINN frente a 8.66 V con ella, mientras en el Escenario 1 la misma familia en el mismo modo daba -6.3% . El contraste es compatible con el lazo de tensión del modulado, cuya ganancia depende del predictor de corriente y, por tanto, de L_f . En esta arquitectura el desajuste de la inductancia puede propagarse hasta la variable controlada. Sobre la rama supranominal la mediana sube a $+10.2\%$, con cuarenta y un rescates y treinta y siete daños.

Esta es la familia donde el reparto entre rescate y daño está más equilibrado de toda la campaña, cincuenta y un rescates frente a cuarenta y cinco daños, y conviene leer el porcentaje mediano junto a la magnitud absoluta. La mediana del error sin identificar es de 10.99 V, un valor bajo comparado con los ochenta y ocho de la familia de impedancia constante, de modo que aquí la corrección opera cerca del piso donde el margen de mejora es estrecho y donde el *ripple* que ella misma introduce pesa tanto como el desajuste que corrige. La lectura correcta no es que la identificación falle en este grupo, sino que un desajuste axial de la inductancia degrada poco la tensión formada y deja poco que recuperar.

En la Figura 5.20, la misma familia en modo conectado a la red es prácticamente neutra, con una mediana del -2.2% y 3.61 A sin la PINN frente a 3.70 A con ella. De las ochenta condiciones supranominales sesenta y seis se clasifican como neutras y ninguna como daño. La lectura es que el integrador en marco sincrónico del modulado ya anula el error de régimen de la corriente de salida, de modo que no queda margen que la corrección paramétrica pueda recuperar. El resultado es compatible con el mecanismo propuesto para la inversión entre modos descrita en la Sección 5.6.1.

Dos rasgos de esta figura conviene dejarlos explicados, porque son los primeros que llaman la atención al leerla. El primero es que las dos curvas de la corriente de salida **no llegan a juntarse en el nominal**. Hay dos motivos y ambos importan. El barrido axial no contiene el nivel $K = 1$, porque el caso nominal se ejecuta como corrida aparte y no como un punto más de la rejilla, de modo que en la unidad la curva solo interpola. Y aunque lo contuviera tampoco coincidirían, porque en este modo el error de la corriente de salida está dominado por el *ripple* del modulador y no por el desajuste del modelo. Su valor de fondo es de 3.61 A a lo largo de toda la familia, la corrección no puede actuar sobre un *ripple* que no procede del modelo, y la dispersión propia del estimador añade unos 0.06 A. Esa diferencia, del orden del dos por ciento, es la que separa las dos trazas de forma casi constante, y coincide con el -1.7% que la corrida nominal reporta en este mismo modo. Queda por debajo del piso de sensibilidad de 0.5 A con que la Sección 5.4.1 clasifica, y por eso estas condiciones se cuentan como neutras y no como daño.

El segundo rasgo es que el orden relativo de las dos parejas de trazas se invierte. Sobre la corriente del lado inversor la corrección sí mejora, de 3.14 a 2.91 A en el entorno del nominal, mientras sobre la corriente de salida queda ligeramente por encima. No es un cruce de series en la leyenda, cosa que se verificó sobre el postproceso, donde el par principal se calcula sobre i_o y el secundario sobre i_f . Es la consecuencia directa del reparto de tareas entre los dos lazos. La corrección paramétrica actúa sobre el predictor, que es quien gobierna i_f , y ahí su efecto se mide. Sobre i_o actúa el integrador en marco sincrónico, que anula el error de régimen con independencia de lo fiel que sea el modelo, de modo que allí no queda nada que la identificación pueda aportar.

Las Figuras B.4(a) y B.4(b) del Apéndice B muestran los casos representativos. En isla, $K_{Lf} = 4.95$ reduce el error de 127.13 a 5.96 V. En red, $K_{Lf} = 0.25$ lo reduce de 54.28 a 5.43 A. Estos valores individuales conviven con una mediana de familia próxima a la neutralidad y, por ello, no deben extrapolarse al barrido completo.

5.6.4. Grupo G2, resonancia desplazada con impedancia conservada

La familia de impedancia característica constante sobre el esquema modulado. El amortiguamiento activo está sintonizado para la resonancia nominal, de modo que desplazarla equivale también a desintonizarlo, y esta es la dirección donde ese efecto se mide.

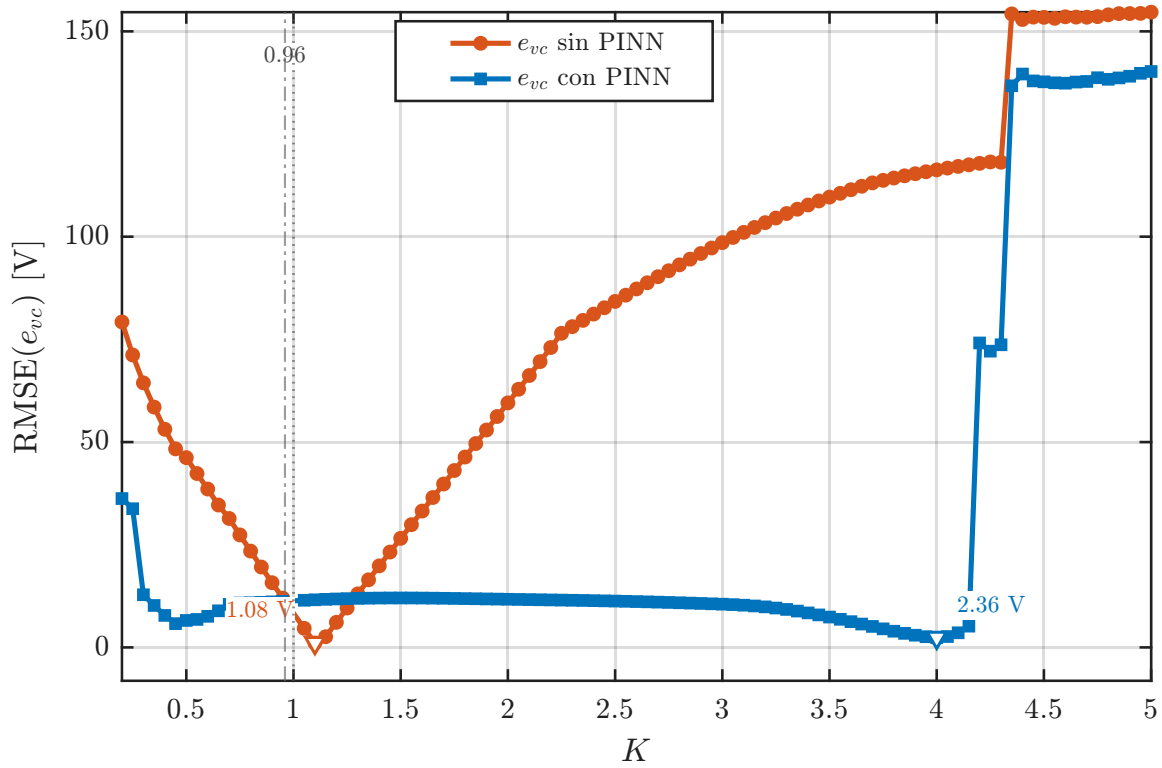


Figura 5.21. Grupo G2, impedancia característica constante, variante directa, modo isla.

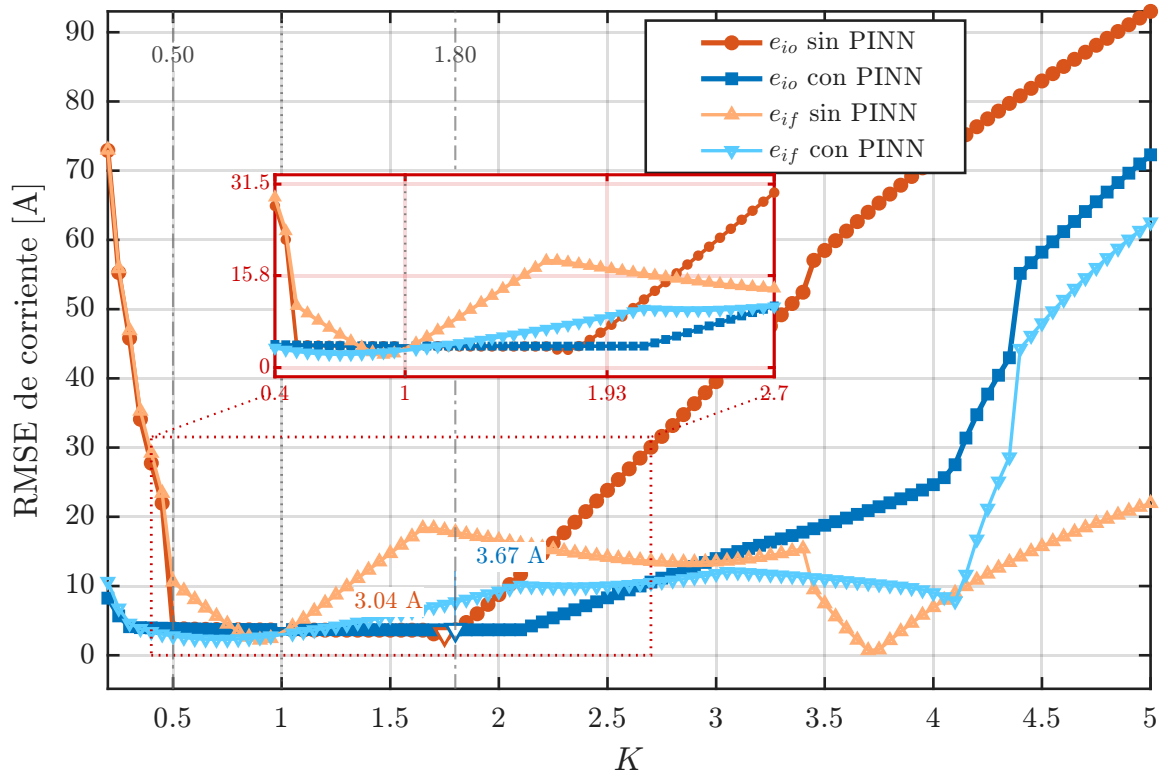


Figura 5.22. Grupo G2, impedancia característica constante, variante directa, modo conectado a la red.

La Figura 5.21 contiene el resultado de frontera más favorable de la memoria. La mediana de la mejora vale +80.9%, con 88.03 V sin la PINN frente a 11.36 V con ella, y de las ochenta condiciones supranominales setenta y cinco son rescate y solo cinco son daño. Lo decisivo es dónde colapsa cada configuración. Sin la PINN el control pierde la tensión formada en $K = 3.05$, y con ella el primer colapso se detecta en $K = 4.25$. La separación entre primeros niveles detectados es 1.20 en K , que es el resultado que la ventana de quince segundos permitió resolver y que la campaña de un segundo no distinguía.

La Figura 5.22 muestra que en modo conectado a la red la misma familia mantiene una corrección alta sobre la rama supranominal, con una mediana del +64.3% y 40.32 A sin la PINN frente a 14.25 A con ella, valores de esa rama y no de la familia completa. La rama subnominal, en cambio, es neutra, con mediana del -0.4% y diez de dieciséis condiciones clasificadas como tales. La asimetría entre ramas es la firma del integrador en marco sincrónico, que absorbe el error de régimen mientras el desajuste sea moderado y deja de bastar cuando la impedancia del filtro crece por encima del nominal.

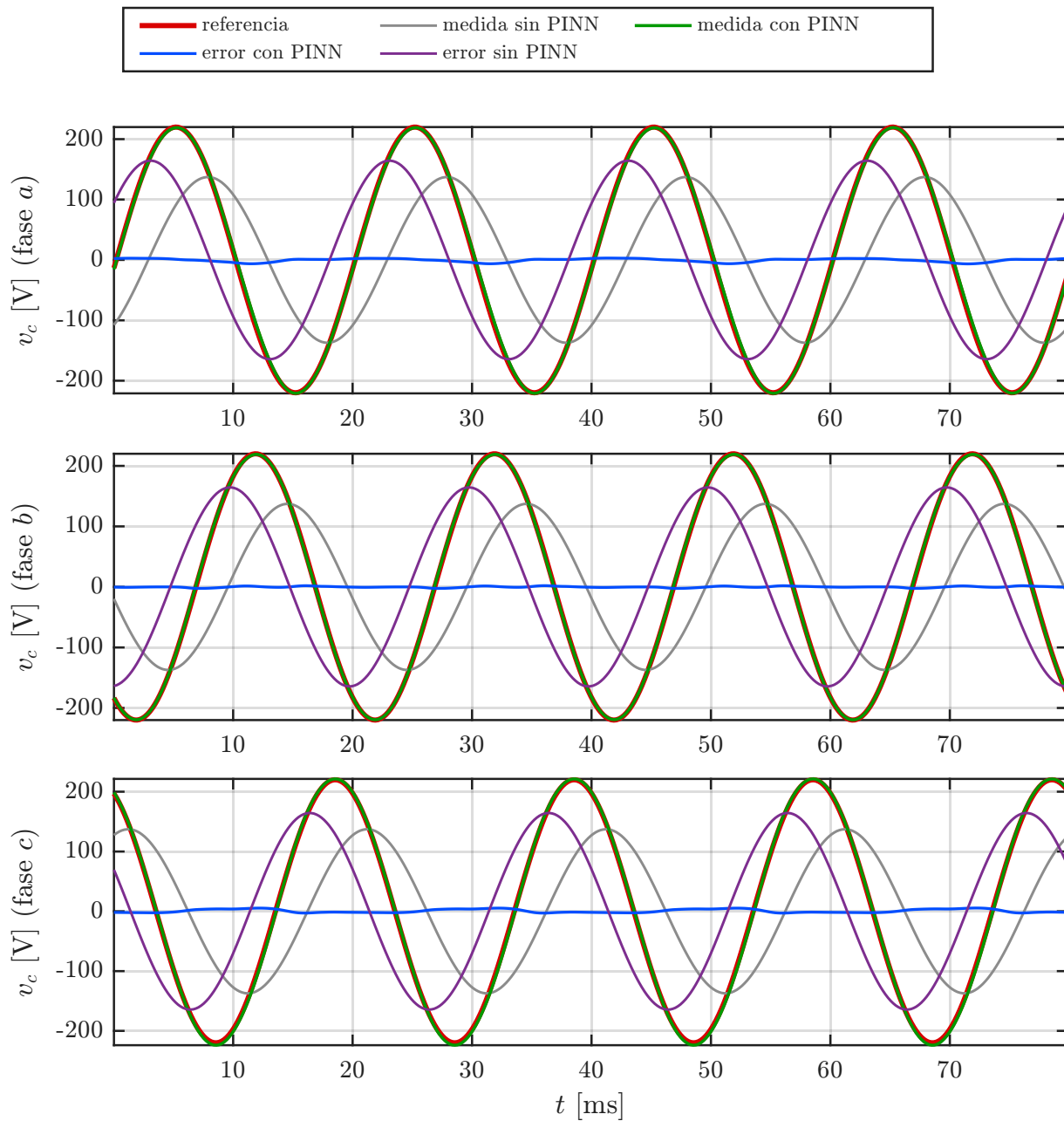


Figura 5.23. Grupo $G2$, variante directa, forma de onda en modo isla, nivel de máxima mejora.

La Figura 5.23 corresponde a $K = 4.00$, con 116.27 V sin la PINN frente a 2.36 V con ella, un 98.0 %. El nivel elegido está en la rama supranominal, justo por debajo de donde la familia colapsa sin corrección, y es donde la identificación rinde más. La onda sin corrección muestra la resonancia desplazada superpuesta a la fundamental, y con ella la tensión formada recupera una forma prácticamente limpia.

La Figura B.5(c) del Apéndice B documenta el caso de red en $K = 0.30$, con una reducción de 45.79 a 4.12 A. La comparación visual con la Figura B.3(c) respalda la diferencia espectral entre actuaciones, sin emplearla como una ablación aislada del modulador.

5.6.5. Grupo G3, barrido axial de la capacitancia

El barrido axial de la capacitancia sobre el esquema modulado. La capacitancia entra además en la ganancia efectiva del lazo de tensión, de modo que perturbarla desplaza el punto de diseño de ese lazo y no solo el del predictor.

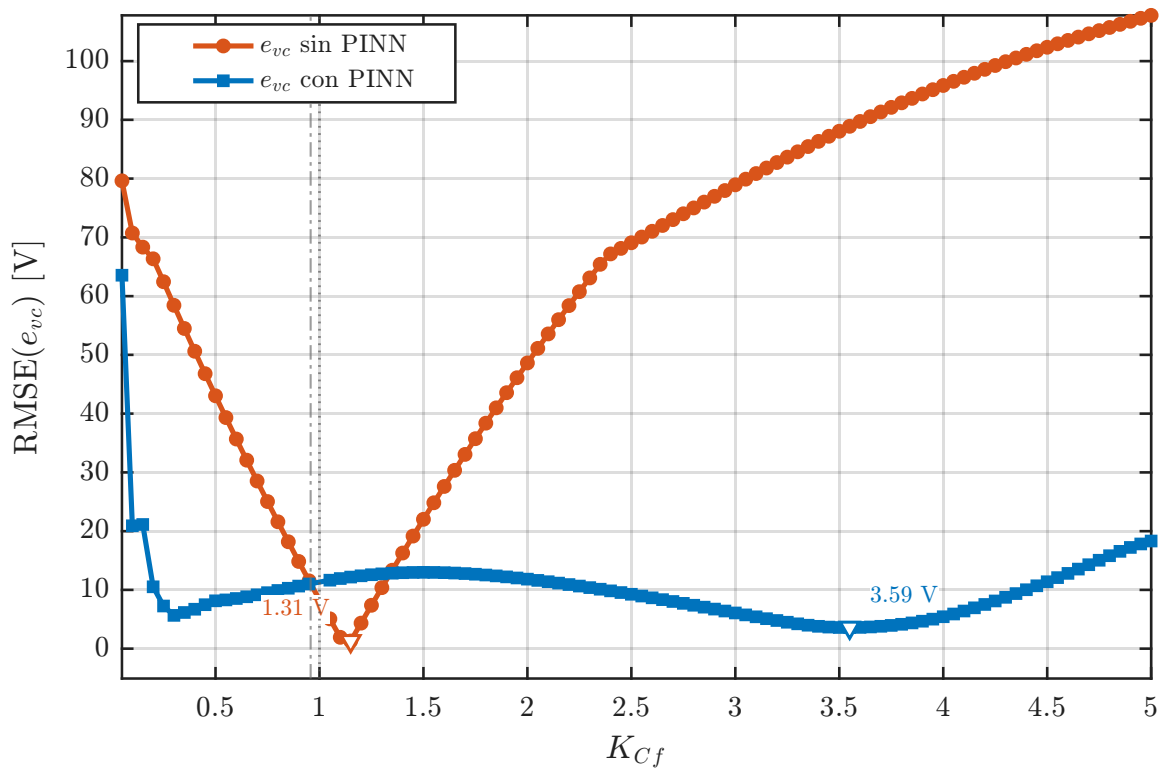


Figura 5.24. Grupo G3, barrido axial de C_f , variante directa, modo isla.

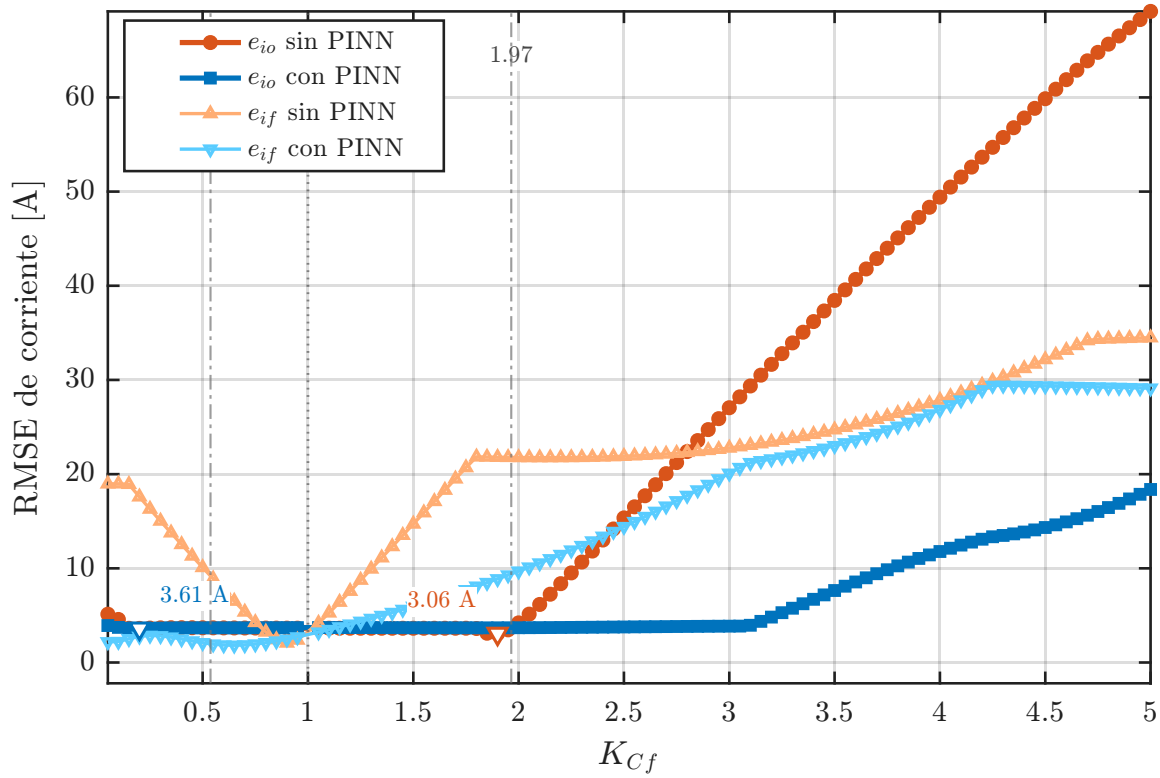


Figura 5.25. Grupo G3, barrido axial de C_f , variante directa, modo conectado a la red.

La Figura 5.24 muestra que el barrido axial de la capacitancia entrega la mediana más alta de las cuatro familias en isla, +86.0 %, con 71.04 V sin la PINN frente a 9.55 V con ella y un máximo del +96.0 %. No hay ninguna condición de colapso en toda la familia. Dos hechos son consistentes con ese resultado. La capacitancia es el parámetro mejor identificado de los dos, y es además el que más pesa en la dinámica de la variable controlada en isla. Por encima de $K = 4.5$ el error con la PINN crece de forma casi lineal, comportamiento que se retoma en la Sección 5.6.8 porque admite dos explicaciones distinguibles con los datos de identificación.

En la Figura 5.25, la familia en modo conectado a la red conserva una corrección alta sobre la rama supranominal, con mediana del +75.7 %, y una rama subnominal neutra, con mediana del 0.0 % y diecisiete de diecinueve condiciones clasificadas como neutras. El tramo neutro cubre desde el extremo inferior del barrido hasta cerca del nominal, y en él las dos curvas se superponen dentro del piso de sensibilidad. Es el mismo patrón de la familia anterior y resulta compatible con la misma explicación física, sin constituir por sí solo una prueba causal.

Las Figuras B.4(c) y B.4(d) del Apéndice B conservan los casos representativos de G3. El error disminuye de 89.73 a 3.62 V en isla, para $K_{Cf} = 3.60$, y de 29.36 a 3.95 A en red, para $K_{Cf} = 3.10$. Las ondas respaldan la diferencia entre las ramas subnominal y supranominal cuantificada por las curvas.

5.6.6. Grupo G4, resonancia fija con impedancia variable

La familia de resonancia fija con impedancia variable sobre el esquema modulado, que es la que fija su frontera. Conviene leerla junto a la del conjunto finito, distinguiendo la actuación, el horizonte de simulación y el criterio con que se declara cada límite.

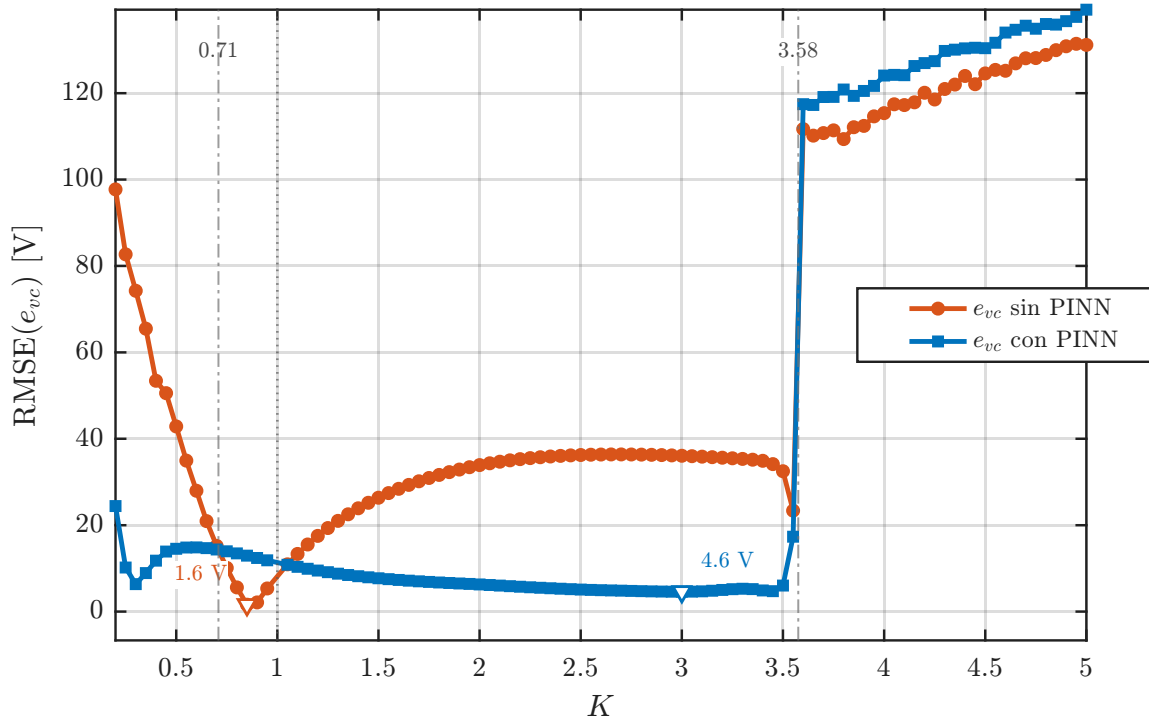


Figura 5.26. Grupo G4, resonancia fija, variante directa, modo isla.

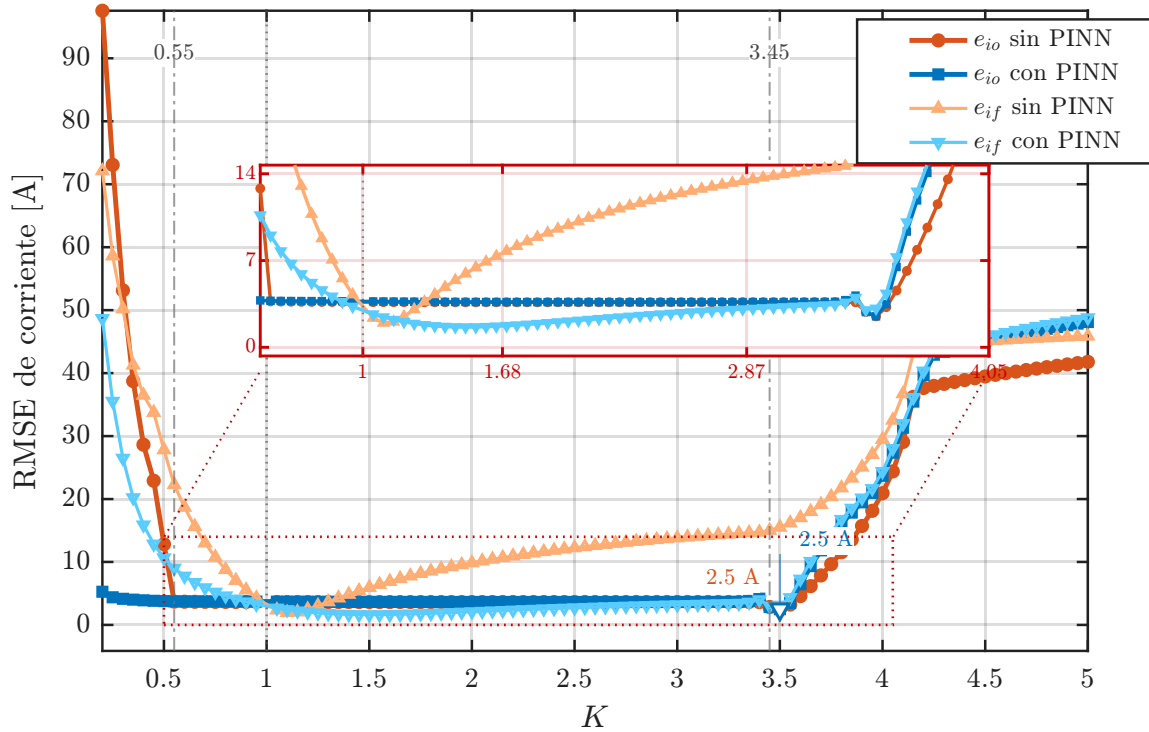


Figura 5.27. Grupo G_4 , resonancia fija, variante directa, modo conectado a la red.

La Figura 5.26 usa registros de un segundo y RMSE entre 0.90 y 0.99 s, y la mejora mediana es +67.3 %. Sin y con PINN se obtienen, respectivamente, 32.49 y 6.03 V en $K = 3.50$, 23.37 y 17.33 V en 3.55, y 111.68 y 117.45 V en 3.60, donde ambas fundamentales caen bajo $f_r = 0.60$. El marcador 3.58 es el cruce interpolado de RMSE ($K = 3.57557$), no una divergencia medida.

La frontera manual de 15 s (Tabla 5.3) comienza en $K = 3.45$ sin PINN y 3.40 con ella. Este último colapsa a los 10.75 s, fuera de la figura. El RMSE corto describe la respuesta previa, y la proximidad a la predicción de tensión es compatible con una restricción de actuación, sin aislar el mecanismo dinámico.

La Figura 5.27 muestra que en modo conectado a la red esta familia es el único caso de las dos campañas donde la corrección perjudica de forma sistemática sobre la rama alta. La mediana vale -0.6% , y de las ochenta condiciones supranominales ninguna se clasifica como rescate, cincuenta y una son neutras y veintinueve son daño. El error absoluto es pequeño en los dos casos, 3.65 A sin la PINN frente a 3.66 A con ella, de modo que el daño es relativo y no compromete el seguimiento. La explicación más consistente con la familia axial de inductancia de este modo es que el integrador ya reduce el error de régimen y la corrección modifica principalmente el transitorio. Aislar esa contribución requeriría una ablación del integrador.

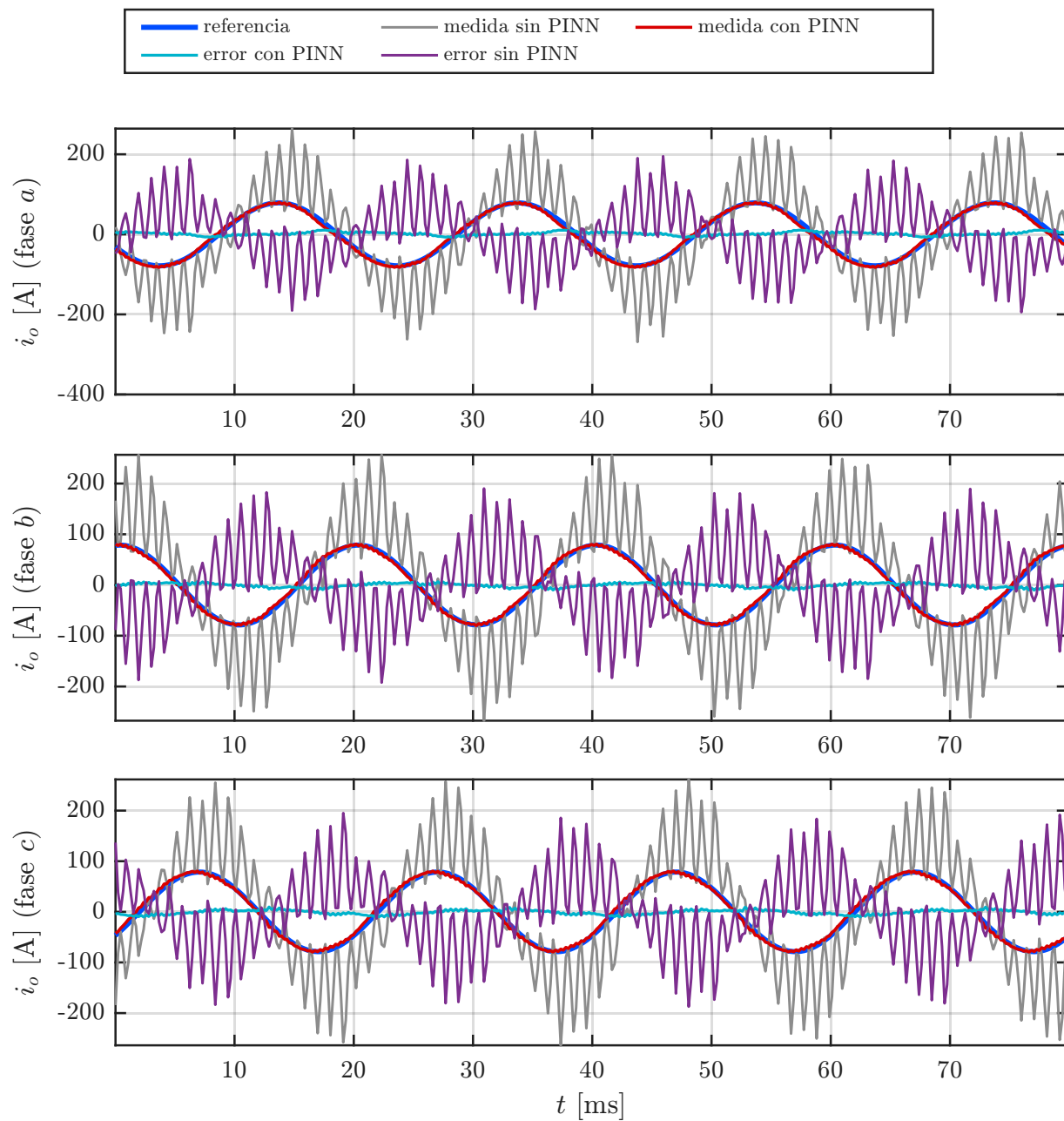


Figura 5.28. Grupo G_4 , variante directa, forma de onda en modo conectado a la red.

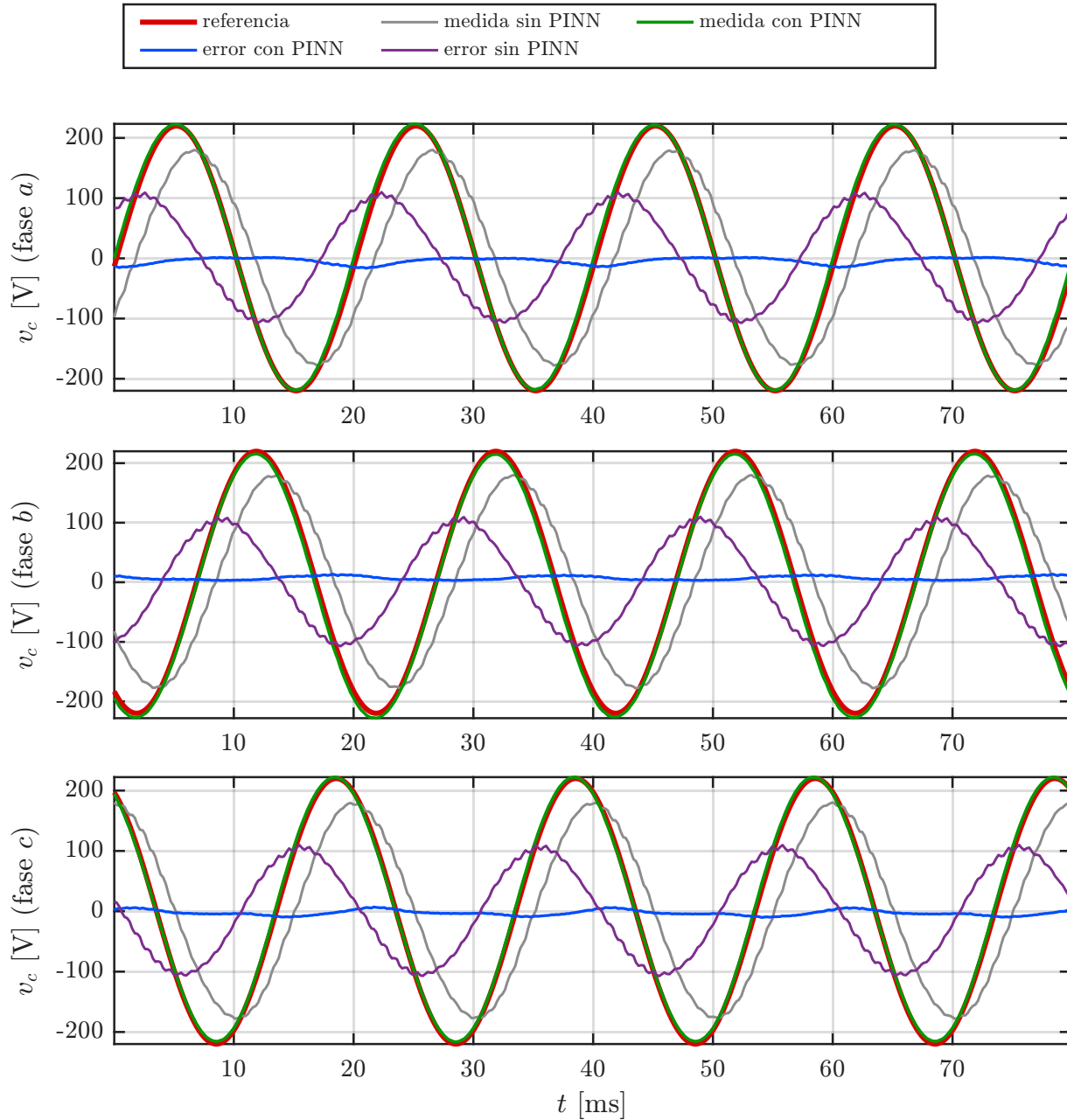


Figura 5.29. Grupo G_4 , variante directa, forma de onda en modo isla, nivel de máxima mejora.

La Figura 5.28 explica en el dominio del tiempo por qué el mapa de este modo está dominado por la neutralidad. Las dos configuraciones siguen la referencia de corriente sin diferencia apreciable de amplitud ni de fase, y lo que se observa es la firma del integrador de la corriente de salida, que anula el error de régimen con independencia de si el predictor usa parámetros nominales o corregidos. El contraste con la Figura 5.13 del Escenario 1, donde el conjunto finito no dispone de ese lazo y la corrección sí separa las dos trazas, es la evidencia más directa de la asimetría anunciada en la Sección 5.3. La corrección paramétrica aporta cuando el conocimiento del modelo limita el seguimiento, y queda en

neutralidad cuando otro lazo ya se ha hecho cargo del error.

La Figura 5.29 corresponde a $K = 0.30$, con 74.26 V sin la PINN frente a 6.36 V con ella, un 91.4 %. El nivel está en la rama subnominal, lejos del colapso de la familia, que llega en $K = 3.60$ para las dos configuraciones, de modo que la onda muestra el régimen donde la corrección tiene todo su margen. La corrida de treinta minutos que se documenta en la Sección 5.6.11 se sitúa en cambio en $K = 3.30$, elegido por ser el último con seguimiento defendible del lado supranominal.

En $K = 0.25$, la Figura B.7(b) del Apéndice B muestra una reducción de 73.07 a 4.39 A. Es un caso favorable individual dentro de una familia con mediana ligeramente negativa.

5.6.7. Grupo G5, escenarios no correlacionados

Las cien combinaciones no correlacionadas sobre el esquema modulado, con el mismo propósito que en el escenario anterior, comprobar que el resultado no depende de la dirección que siga la perturbación en el plano, y evaluadas frente a la misma severidad $\sigma(\mathbf{K})$.

Las medianas de G5 son +71.7 % en isla y +73.8 % en red. En isla se cuentan setenta y siete rescates, cuatro neutros y diecinueve daños, concentrados en severidades altas próximas a la dirección G4. La nube amplía la comprobación más allá de cuatro direcciones, sin definir otra frontera. La Figura B.8 del Apéndice B conserva dispersiones y ondas de máxima mejora: 97.08 a 3.28 V en isla y 71.98 a 4.35 A en red. La diferencia espectral respecto del Escenario 1 no separa modulador, muestreo y lazos complementarios.

5.6.8. Identificación paramétrica

La identificación del esquema modulado se mide con el mismo criterio que la del conjunto finito. La comparación entre ambas arroja una diferencia compatible con la excitación, sin atribución causal, pues no se aislaron el muestreo, el modulador, el amortiguamiento ni los lazos externos.

Tabla 5.10

ESCENARIO 2. ERROR DE IDENTIFICACIÓN $|\ln(\rho/K)|$ Y SESGO ρ/K POR GRUPO Y MODO.

Grupo	Modo	$ \ln(\rho/K) $ [%]		sesgo ρ/K	
		L_f	C_f	L_f	C_f
G1	isla	19.6	3.9	0.828	0.999
G1	red	4.5	2.4	1.006	1.014
G2	isla	21.5	5.7	0.808	0.990
G2	red	7.7	1.7	0.942	0.995
G3	isla	5.3	4.8	0.978	1.003
G3	red	5.2	1.3	0.949	0.997
G4	isla	8.0	6.8	0.948	0.936
G4	red	4.9	4.1	1.025	0.966
G5	isla	8.1	8.1	0.997	1.061
G5	red	28.7	5.3	1.332	0.997
global	—	6.9	4.2	—	—

La Tabla 5.10 admite la misma lectura por columnas que su equivalente del conjunto finito, y la comparación entre las dos es el resultado que interesa.

El error de identificación del modulado es mayor en isla y comparable en red. El valor mediano global pasa de 3.0 a 11.2 % en la inductancia y de 2.8 a 5.2 % en la capacitancia en modo isla, mientras en modo conectado a la red se queda en 5.6 frente a 4.2 y en 2.4 frente a 1.8 %, diferencias mucho menores. **La penalización del esquema modulado se concentra por lo tanto en el modo que forma tensión**, que es justo donde la excitación depende solo de la referencia interna. Una explicación compatible, no aislada mediante ablación, está en el espectro de la excitación. El conjunto finito conmuta con espectro disperso y deja contenido en un rango amplio de frecuencias, mientras el modulado lo concentra en la portadora y el propio filtro lo atenúa. Esto podría modificar la información disponible para identificar, sin que aquí se cuantifique separadamente ese efecto. El resultado también es compatible, en sentido contrario, por qué la corrección rinde más en este escenario, un filtro mejor amortiguado deja menos *ripple* que observar y a la vez más margen de seguimiento que ganar.

La asimetría entre modos se agranda. En el conjunto finito la razón entre el error en isla y en red vale 0.7 para la inductancia, y aquí vale 2.0. En isla el maestro forma tensión sobre una referencia fija. La menor variación del punto de operación es una posible limitación de excitación, no una causa demostrada de esa razón de errores.

El caso extremo es G5 en modo conectado a la red, con 28.7 % de error mediano en la inductancia y un sesgo de 1.332, el peor valor de las dos campañas. Es el único bloque de la tabla donde la estimación se aleja al alza de forma clara, y no es casual que sea el muestreo no correlacionado, en el que los dos factores se mueven de forma independiente y ninguna de las dos direcciones estructuradas ayuda a desacoplarlos. En isla, en cambio, los peores valores son G2 y G1 en la inductancia, con 21.5 y 19.6 %, las dos familias en que L_f crece sin que la resonancia se aleje lo bastante para hacerse visible en la ventana.

El sesgo es sistemático y negativo en la inductancia en isla, entre -0.3 y -19.2 %, mientras en la capacitancia es prácticamente insesgado, entre -6.4 y $+6.1$ %. La PINN subestima sobre todo la inductancia, lo que equivale a suponer un filtro menos degradado de lo que está en ese parámetro. Esa lectura debe retenerse junto con el resultado del Capítulo 5 sobre el índice de modulación, porque las dos apuntan al mismo lugar, la corrección acerca el modelo interno a la planta pero no lo alcanza, y el margen que queda se consume en tensión.

Lo que la tabla no dice, y hay que decir. Un error de identificación del veinte por ciento no se traslada al desempeño en la misma proporción. Las medianas de mejora de este escenario superan el sesenta y siete por ciento en tres de las cuatro familias en isla, de modo que la corrección aporta aunque el factor no se acierte con precisión. El predictor no necesita el valor exacto, necesita moverse en la dirección correcta y con la magnitud aproximada.

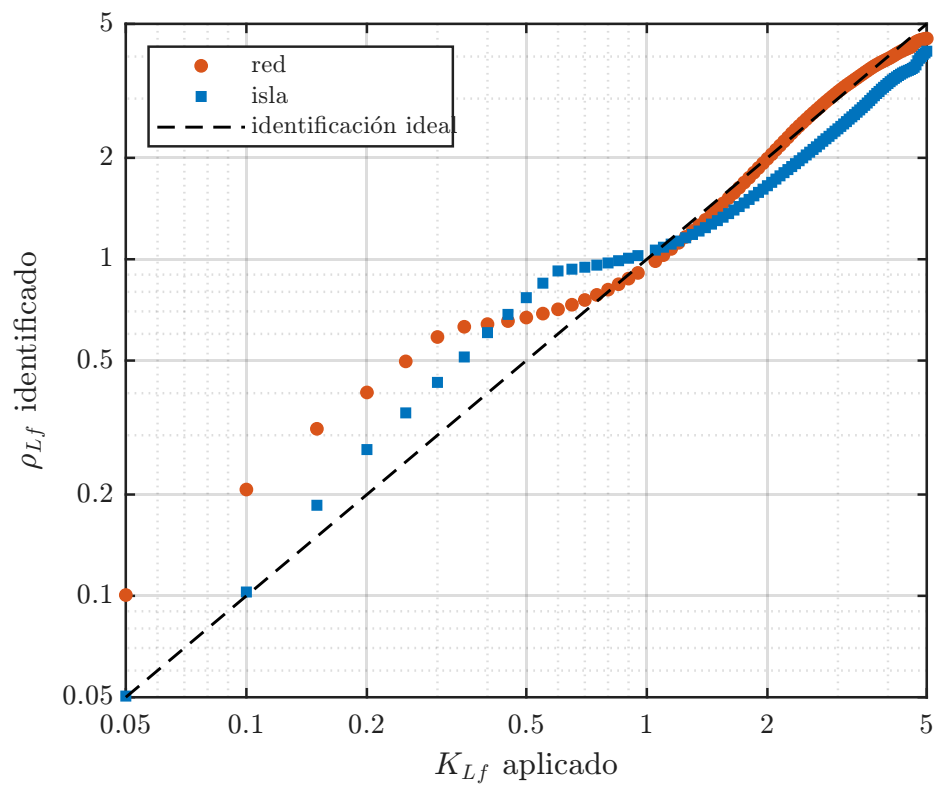


Figura 5.30. Factor de inductancia identificado frente al aplicado, barrido axial.

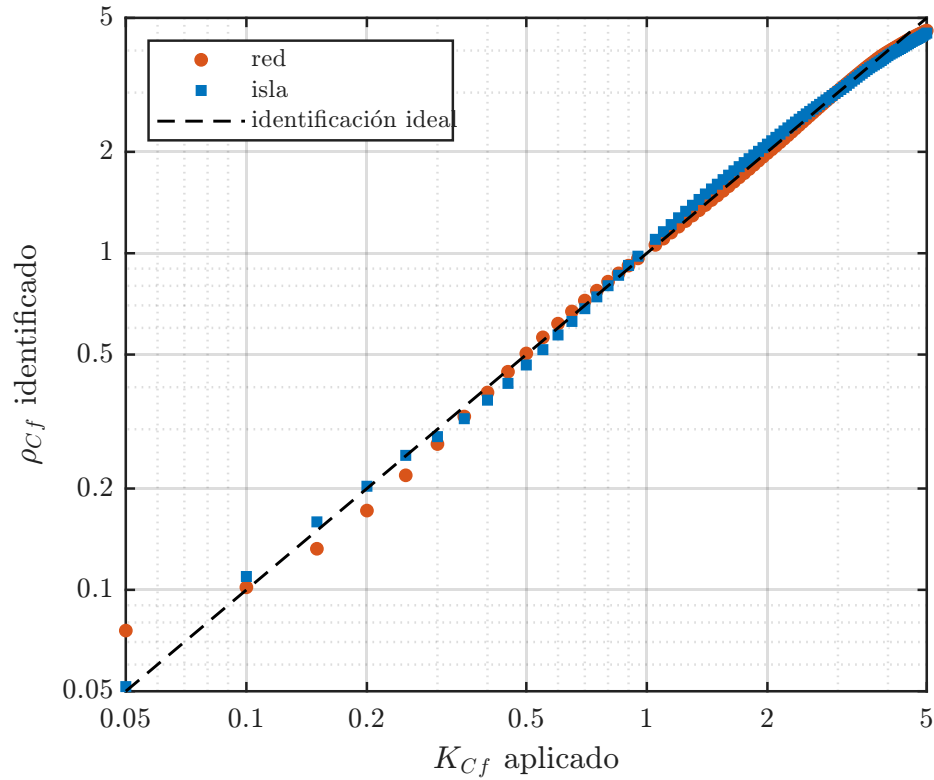


Figura 5.31. Factor de capacitancia identificado frente al aplicado, barrido axial.

La Figura 5.30 muestra que el error de identificación del modulado es mayor que el del conjunto finito **en todas las combinaciones en isla, y comparable en modo conectado a la red**, donde tres de las diez celdas se invierten. Para G1 en isla las medianas valen 19.6 % en la inductancia y 3.9 % en la capacitancia, frente al 4.5 y al 2.6 % del Escenario 1. La explicación que se propone, consistente con los datos pero no aislada mediante una ablación específica, está en el espectro de la excitación. El conjunto finito conmuta con espectro disperso y deja contenido en un rango amplio de frecuencias, mientras el modulado lo concentra en la portadora y lo amortigua. La posible reducción de información identificable permanece como hipótesis y no como resultado aislado. La razón entre los errores medianos de los dos escenarios se aproxima a la razón entre sus periodos de muestreo, coincidencia numérica que se declara como tal en la Sección 5.6.8.

La Figura 5.31 completa el resultado. Sobre el conjunto de la campaña la mediana del error de identificación es de 6.9 % para la inductancia y 4.2 % para la capacitancia. Estas cifras se obtienen directamente de los registros evaluados y no de una banda estimada, que no fue cierta para la campaña completa.

El dato que el módulo del error esconde es el *signo*. La columna de sesgo de la Tabla 5.10 muestra que en isla la PINN subestima la inductancia de forma sistemática, con razones ρ_{Lf}/K_{Lf} entre 0.81 y 1.00, mientras la capacitancia queda prácticamente centrada. El caso extremo es la inductancia en el grupo de impedancia característica constante, con una razón de 0.808, es decir una subestimación del 19 %.

Esa subestimación no es solo un detalle de exactitud, sino un mecanismo compatible con el comportamiento de la Sección 5.6.11. La ganancia efectiva del lazo de tensión viene

dada por

$$K_{v,eff} = \frac{K_v T_s}{\rho_{Cf} C_f}. \quad (5.27)$$

Por lo tanto, subestimar la capacitancia eleva esta ganancia por encima de su valor de diseño. **Que la capacitancia haya quedado prácticamente insesgada es por eso un resultado favorable**, porque retira del lazo de tensión el sesgo que en la formulación anterior lo desplazaba de su punto de diseño.

La asimetría entre ramas es más acusada que en el conjunto finito y cambia de naturaleza. En las dos familias axiales en modo conectado a la red la rama subnominal es neutra, con medianas del -1.7 y del 0.0% , mientras la supranominal supera el setenta y cinco por ciento en la axial de capacitancia. No es que la corrección falle por debajo del nominal, es que allí el integrador en marco sincrónico ya ha anulado el error de régimen y no queda nada que recuperar. La figura hace visible que el margen de mejora del modulado depende del modo mucho más que del sentido de la perturbación.

5.6.9. Contraste del límite de tensión con la campaña

Las Figuras B.6(d) y B.6(c) se trasladan al Apéndice B. La primera enfrenta dos magnitudes que no deben confundirse. El índice *solicitado* es el que exige la ecuación (5.18) evaluada con los fasores de 50 Hz medidos y los valores reales de cada escenario. Puede superar la unidad, porque nadie lo ha limitado todavía. El índice *aplicado* se reconstruye de la dinámica medida de la corriente de filtro y es el que el modulador realiza tras proyectar el vector y recortar cada fase. Las dos curvas de la figura son amplitudes de la fundamental, de modo que son comparables entre sí.

La lectura es directa. Las dos curvas coinciden mientras hay margen de tensión y se separan en cuanto el recorte entra en acción, momento en el que el convertidor deja de entregar lo que el control le pide. En la familia de resonancia fija en isla el índice solicitado **se aproxima al límite sin llegar a cruzarlo**, alcanza un máximo de 0.988 en $K = 3.55$, y es exactamente ahí donde la razón de la fundamental $|V_{C,1}|/|V_{ref,1}|$ abandona la unidad, primero hasta 0.939 en ese mismo nivel y después hasta 0.391 en $K = 3.60$, donde ya no se recupera en ninguno de los veintinueve niveles siguientes hasta el borde de la banda entrenada.

Que el índice se quede en el uno coma dos por ciento por debajo de la unidad no debilita la lectura, la precisa. El criterio de la Sección 5.1.5 acota la amplitud de la fundamental, mientras la tensión que el puente debe sintetizar en cada instante lleva además el *ripple* de conmutación. Cuando la fundamental solicitada roza el límite, el recorte ya está actuando sobre los *peaks*, y el índice *aplicado* lo delata, pasa de 0.991 en $K = 3.50$ a valores por encima de la unidad desde $K = 3.60$. La frontera no es por tanto el punto donde el índice solicitado cruza uno, sino aquel en que deja de haber holgura para el *ripple* por encima de la fundamental pedida.

La transición es además **abrupta**. El seguimiento se mantiene en 6.03 V hasta $K = 3.50$, se degrada a 17.33 V en $K = 3.55$ y salta a 117.45 V en $K = 3.60$. No hay el deterioro gradual que precede a otros colapsos, lo que es coherente con un mecanismo de saturación y no de pérdida progresiva de fidelidad del modelo, porque hasta el último nivel sano la identificación sigue siendo correcta.

Los niveles de pérdida de seguimiento no deben compararse mezclando la ventana corta

y los antecedentes manuales. Lo que sí se compara directamente es el límite de actuación. El límite de tensión en este escenario vale $V_{dc}/2$ en lugar de $V_{dc}/\sqrt{3}$ porque la modulación senoidal no inyecta secuencia cero, de modo que el conjunto finito dispone de un 15.5 % más de tensión sintetizable, o dicho a la inversa, el modulado queda un 13.4 % por debajo. Esta diferencia interviene en la cota de la Sección 5.1.5, pero no implica una reducción porcentual idéntica del nivel crítico, que también depende del filtro y de los lazos de control.

5.6.10. Contraste entre las familias acopladas

El resultado anterior no se generaliza a toda la campaña, y esa es su parte más interesante. En el grupo G3 el índice solicitado no supera 0.68 en ningún nivel, y en G2 se queda en 0.947 sin acercarse al límite en la zona donde colapsa, de modo que su colapso no puede atribuirse al límite de tensión disponible.

En G4, $K_{Lf} = K$ y $K_{Cf} = 1/K$ conservan la frecuencia natural en 129.9 Hz, mientras $Z_0(K) = KZ_{0,nom}$ pasa de 2.449 Ω nominales a 12.247 Ω en $K = 5$ y disminuye la contribución resistiva al amortiguamiento. En G2, Z_0 es constante y la frecuencia $129.9/K$ cruza 50 Hz cerca de $K = 2.6$. El registro de quince segundos sin PINN detecta colapso en $K = 3.05$ (Apéndice A.3), por lo que ese cruce no basta para explicarlo.

Con la PINN activa el primer colapso se detecta en $K = 4.25$, con frecuencia natural de 30.6 Hz. En el barrido axial de capacitancia el desplazamiento es aún mayor, el caso sin identificación colapsa desde $K = 3.35$ y **con identificación no colapsa en ninguno de los noventa y nueve niveles**.

Estas familias separan exactamente impedancia y frecuencia natural del filtro pasivo, no los mecanismos del lazo cerrado, que incluye realimentación, retardos y límites de actuación.

5.6.11. Verificación con ventana larga

Las métricas de la campaña se obtienen al final de registros de un segundo, y esa ventana no distingue un régimen permanente de un colapso todavía no consumado. Para acotar el problema se ajustó primero el logaritmo del error sobre ocho ventanas entre 0.20 y 0.99 s, lo que identifica 3 pares condición–modo con crecimiento sostenido de los 982 evaluados, de los cuales 2 estaban clasificados como rescate. Ese indicador se usó solo como criba. El desenlace se resolvió repitiendo las dos familias acopladas en modo isla con $StopTime = 15$ s sobre el barrido continuo de $K = 2.00$ a 5.00, en total 122 condiciones y 244 corridas válidas, cuyo resultado recoge la Tabla 5.11.

Tabla 5.11

ESCENARIO 2. FRONTERA DE COLAPSO A QUINCE SEGUNDOS Y ESTABILIDAD DE LA MEJORA, MODO ISLA.

Grupo	n	Frontera de colapso		mejora 1 s	mejora 15 s
		sin PINN	con PINN		
G2	61	3.05	4.25	+86.6	+86.7
G4	61	3.45	3.40	+85.9	+85.8

La verificación entrega tres resultados. El primero cierra la objeción de método, porque de las 122 condiciones 76 confirman su clasificación y 45 colapsan en las dos configuraciones. **El número de rescates revocados al pasar de uno a quince segundos es 1 sobre 122**, de modo que la ventana corta no certifica mejoras falsas y deja de ser una limitación del método de medida. El segundo es que **la mejora no se degrada**, se mantiene en 86.7% frente a los 86.6% del primer segundo en el grupo de impedancia constante y en 85.8% frente a 85.9% en el de resonancia fija, es decir una décima de punto en los dos casos. Con los modelos corregidos la corrección no solo sobrevive a la ventana larga, la atraviesa sin perder autoridad.

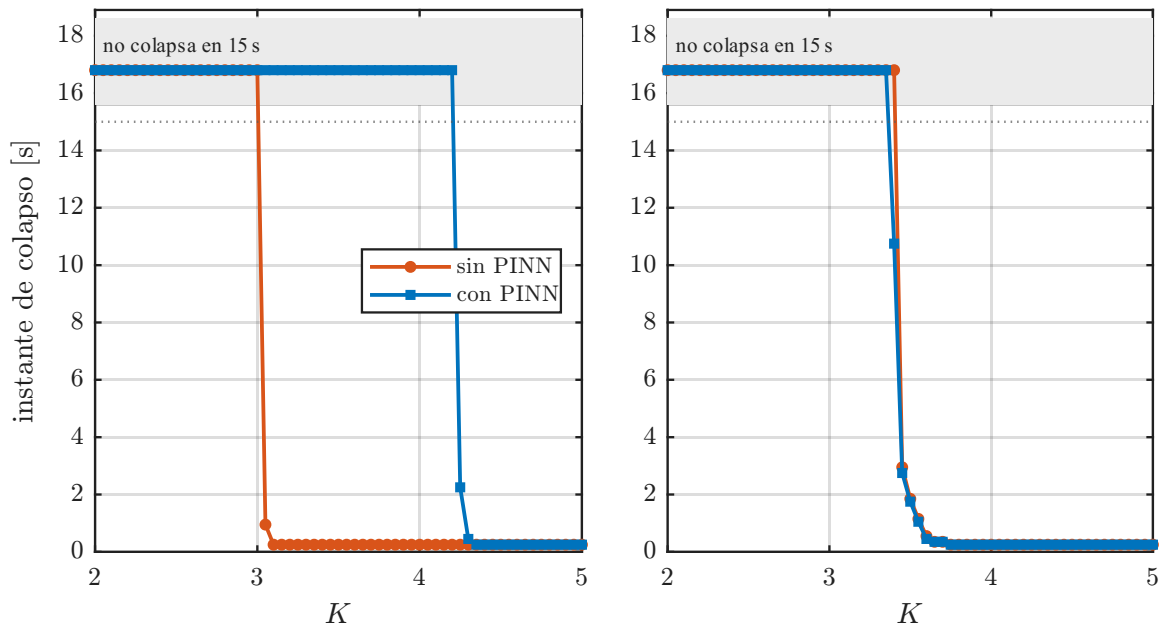


Figura 5.32. *Instante de colapso frente al nivel de perturbación en registros de quince segundos, modo isla.*

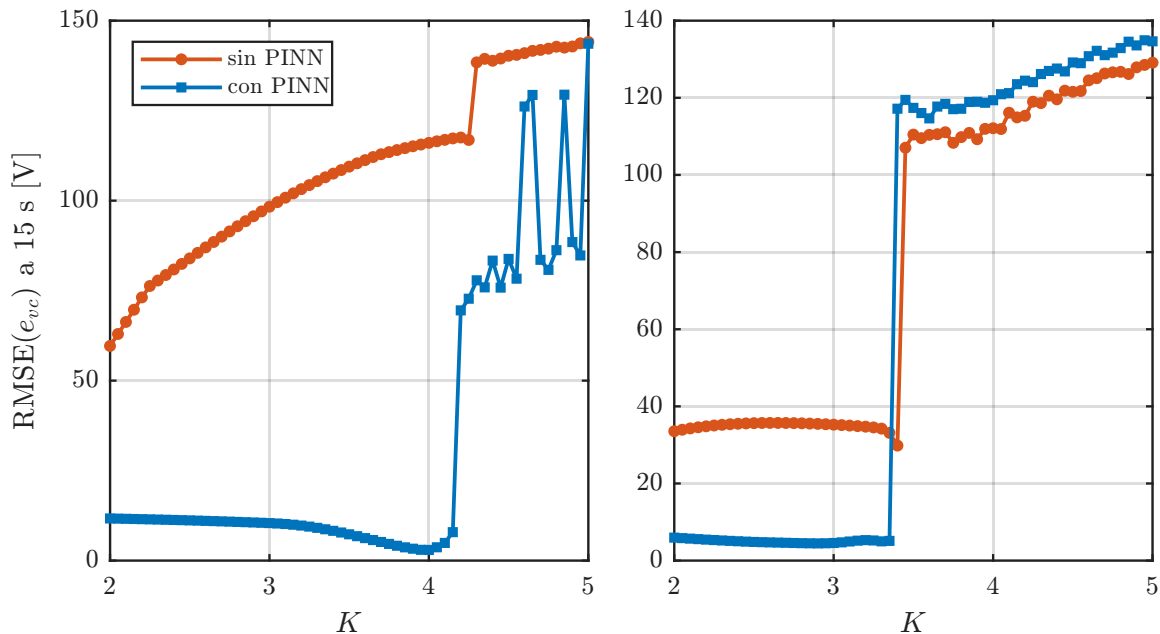


Figura 5.33. Error de régimen medido a quince segundos frente al nivel de perturbación, modo isla.

El tercero es el que la Figura 5.32 hace visible, y separa las dos familias. En el grupo de impedancia constante las dos curvas se apartan, el colapso aparece desde $K = 3.05$ sin identificación y se retrasa hasta $K = 4.25$ con ella. Entre esos niveles hay 24 condiciones, de $K = 3.05$ a $K = 4.20$, en las que **el sistema colapsa sin identificación y se sostiene con ella durante los quince segundos completos**, con 7.0 V de error frente a 111.7 V. Es el resultado más fuerte de la campaña y la ventana corta no podía mostrarlo. En el grupo de resonancia fija, en cambio, las dos fronteras quedan a un solo paso de malla, $K = 3.45$ sin identificación y $K = 3.40$ con ella, y por encima las dos curvas caen juntas. La separación es pequeña en las dos configuraciones ensayadas, lo que no demuestra que ningún estimador pueda modificarla.

Conviene enfrentar estos niveles con los de la Figura 5.26, porque las dos ventanas no señalan el mismo punto y la diferencia es el resultado, no un desacuerdo. Sobre registros de un segundo esa familia se sostiene hasta $K = 3.50$ con 6.03 V de error, se degrada a 17.33 V en $K = 3.55$ y salta a más de 110 V en $K = 3.60$ en las dos configuraciones. La ventana de quince segundos adelanta el desenlace a $K = 3.45$ sin identificación y $K = 3.40$ con ella, es decir entre tres y cuatro pasos de malla antes. Reproducir el barrido con registros cortos devuelve por tanto un indicador de corto plazo. La diferencia incluye el horizonte y los umbrales distintos: $f_r < 0.60$ al final del registro corto y primera ventana de 100 ms con $f_r < 0.90$ en el largo. Es el motivo por el que la Tabla 5.3 distingue sus fronteras manuales de los indicadores cortos.

La Figura 5.33 añade el contrapunto. En la frontera de resonancia fija la identificación adelanta el instante de colapso, porque en el nivel crítico la configuración nominal aguanta los quince segundos completos mientras la corregida cae en 10.75 s, lo que es coherente con que un menor error de seguimiento exija más tensión y alcance antes el límite del convertidor. No indica que la corrección origine el colapso, y concuerda con el nivel crítico

de 3.371 que predice el criterio de tensión. La verificación cubre los dos grupos acoplados en modo isla sobre $K \in [2.00; 5.00]$. Los grupos axiales y el modo conectado a la red no se repitieron porque su tasa de crecimiento medida es nula o negativa en todo el barrido, decisión que se apoya en una medida y queda registrada como límite del alcance.

5.7. Balance energético y corriente del enlace de continua

Las dos secciones anteriores dejan abierta una pregunta. Se sabe que las familias G2 y G4 pierden el seguimiento en isla al crecer el nivel de perturbación, y se han medido dos indicios distintos, el límite de tensión del convertidor en G4 y una corriente capacitiva circulante creciente en G2. Ninguno estaba aislado todavía como mecanismo dominante. Esta sección cierra el balance de energía del convertidor maestro y contrasta ambas lecturas.

5.7.1. Formulación y reconstrucción de la corriente del enlace

El convertidor se modela con interruptores ideales, de modo que la potencia que entrega el enlace de continua se reparte sin pérdidas de conmutación entre las pérdidas óhmicas, la variación de la energía almacenada y la potencia que abandona el nodo del condensador,

$$p_{dc} = p_{R_f} + \frac{dW_L}{dt} + p_{R_{fc}} + \frac{dW_C}{dt} + p_{out}, \quad (5.28)$$

donde cada término se calcula sobre las tres fases $x \in \{a, b, c\}$ como

$$\begin{aligned} p_{R_f} &= R_f \sum_x i_{f,x}^2 && \text{disipación en la resistencia serie del inductor,} \\ W_L &= \frac{1}{2} L_f \sum_x i_{f,x}^2 && \text{energía almacenada en el inductor,} \\ p_{R_{fc}} &= R_{fc} \sum_x i_{c,x}^2 && \text{disipación en la resistencia de la rama capacitiva,} \\ W_C &= \frac{1}{2} C_f \sum_x v_{Cf,x}^2 && \text{energía almacenada en el condensador,} \\ p_{out} &= \sum_x v_{c,x} i_{o,x} && \text{potencia que abandona el nodo del filtro.} \end{aligned} \quad (5.29)$$

La corriente de la rama capacitiva es la diferencia $i_c = i_f - i_o$, y conviene precisar qué tensión registra la campaña, porque las dos que aparecen en la ecuación (5.29) no son la misma. **La señal guardada es la del condensador puro, v_{Cf}** , que es la que entra en W_C sin transformación alguna. La del nodo, que es la que multiplica a la corriente de salida en p_{out} , está una caída por encima,

$$v_c = v_{Cf} + R_{fc} i_c. \quad (5.30)$$

El punto de medida no se supone, se identifica. Ajustando por mínimos cuadrados la impedancia que separa la señal registrada de la tensión del punto de acople común sobre los seis niveles de despacho del barrido de consignas se obtienen 0.5002Ω para la rama

capacitiva y $0.0100 + 0.0063j \Omega$ para la línea, es decir los valores nominales de la planta sin ningún grado de libertad ajustado, y la reconstrucción $\mathbf{v}_{PCC} = \mathbf{v}_{Cf} + R_{fc}\mathbf{i}_c - Z_l\mathbf{i}_o$ devuelve la tensión medida con 0.009 V de error sobre 220 V en el Escenario 1. En el Escenario 2 el residuo sube a 0.63 V, un 0.29 %, y el ajuste revela una reactancia espuria de -0.016Ω equivalente a 1.9° , del orden de medio periodo de muestreo del esquema modulado, de modo que se atribuye al registro y no a la planta.

Los parámetros que entran en el balance son los de la *planta*, es decir el factor de campaña aplicado sobre el nominal, y no los que la PINN entrega al predictor.

La pieza que hace viable el balance sin resimular es que la campaña guardó la acción aplicada por cada rama. Para un estado FCS se define $d_x = S_x \in \{0, 1\}$, mientras que en el esquema modulado el ciclo de trabajo se obtiene de la modulante normalizada, $d_x = (1 + m_x)/2$. Con esa definición común, la corriente media del enlace se reconstruye de forma algebraica,

$$i_{dc}(k) = \sum_{x \in \{a,b,c\}} d_x(k) \bar{i}_{f,x}(k), \quad \bar{i}_{f,x}(k) = \frac{1}{2} [i_{f,x}(k) + i_{f,x}(k+1)], \quad (5.31)$$

sin derivadas numéricas ni observadores. La semisuma aproxima la corriente media del intervalo de control. El registro conserva una muestra por actualización, mientras la corriente evoluciona dentro del intervalo bajo el estado aplicado o bajo el promedio impuesto por el PWM. Usar solo la muestra inicial sesga la potencia reconstruida tanto más cuanto mayor es el *ripple* de conmutación, que es justamente lo que ocurre al reducir L_f . El término de modo común se cancela solo, porque la tensión de polo referida a cualquier punto difiere en una componente que multiplica a $\sum_x i_{f,x}$, y el sistema es de tres hilos.

Comprobación contra la medida directa. Habilitando la medida directa de la corriente del enlace en el modelo y cotejándola con la ecuación (5.31) sobre la familia de resonancia fija en isla, las dos señales resultan equivalentes para el balance integrado, con un coeficiente de correlación de 0.9999. La comparación aísla además el papel de la semisuma, que es la única aproximación real. Sin ella la corriente media queda un 8.6 % por debajo del cociente entre la potencia del punto de acople y la tensión de bus, cota que ninguna corriente de enlace puede incumplir. Con ella la corriente supera esa cota en un 0.9 %, que son las pérdidas óhmicas. El promedio dentro del periodo es por lo tanto necesario, y la elección entre medir y reconstruir es indiferente.

El balance se evalúa *integrado* sobre la ventana de régimen y no instante a instante, con lo que los dos términos de almacenamiento se reducen a una diferencia de energía entre extremos y desaparece el ruido de derivar señales conmutadas. El residuo relativo,

$$\varepsilon = \frac{E_{dc} - E_{Rf} - E_{Rfc} - \Delta W_L - \Delta W_C - E_{out}}{|E_{dc}|}, \quad (5.32)$$

es la métrica de la sección. Se normaliza por la energía que entrega el enlace, de modo que ε se lee como la fracción de la energía inyectada que el balance no explica, y su signo distingue si entra más de lo contabilizado o menos. Las figuras muestran potencias medias en lugar de energías, porque la ventana de integración es común a todos los casos y dividir por su duración conserva tendencias y comparaciones, con la ventaja de que la potencia es la magnitud con la que se dimensiona un convertidor.

5.7.2. Cierre del balance en régimen sano

Sobre los 768 registros de G2 y G4 en isla, los dos escenarios y las dos variantes, el balance cierra una vez que la potencia de salida se evalúa en el nodo según la ecuación (5.30). La Tabla 5.12 lo resume junto a el *ripple* de la corriente del enlace, definido como su desviación típica relativa al valor medio sobre la misma ventana de régimen,

$$\delta_{i_{dc}} = \frac{\sigma(i_{dc})}{|i_{dc}|} \times 100 \%, \quad (5.33)$$

de modo que supera el cien por ciento cuando el *ripple* de conmutación es mayor que la componente continua, que es lo que ocurre en el conjunto finito. Las dos columnas de residuo se calculan sobre el intervalo $K \in [2, 3.5]$, común a las cuatro familias.

Tabla 5.12

RESIDUO DEL BALANCE SEGÚN EL PUNTO EN QUE SE EVALÚA LA POTENCIA DE SALIDA, MODO ISLA.

Grupo, escenario	$\delta_{i_{dc}} [\%]$	ε con $v_{Cf} [\%]$		ε con $v_c [\%]$	
		rango	mediana ·	rango	mediana ·
G4, 1 conjunto finito	171.8	−3.85 a −2.06	2.87	−0.40 a +0.29	0.10
G4, 2 MPC modulado	43.0	−0.72 a +0.62	0.32	+2.04 a +2.91	2.44
G2, 1 conjunto finito	153.6	−11.93 a −10.58	11.35	−0.34 a +0.24	0.05
G2, 2 MPC modulado	53.4	−12.88 a −7.40	9.70	+0.52 a +2.42	1.51

La lectura de la tabla es directa. Evaluando la salida sobre la señal registrada, es decir sobre v_{Cf} , el residuo es **negativo en 728 de los 768 registros, sin una sola excepción en tres de las cuatro familias**, y esa constancia de signo es la firma de un término omitido y no de un error numérico. Las cuarenta excepciones pertenecen todas a la familia de resonancia fija del Escenario 2, la de menor residuo absoluto, donde el término omitido queda por debajo del ruido de la propia medida. Evaluándola en el nodo desaparece. Sobre los 62 registros que cada familia aporta dentro de la ventana declarada, la mediana del Escenario 1 cae de 2.87 a 0.10 % en resonancia fija y de 11.35 a 0.05 % en impedancia característica constante, y el rango pasa a repartirse en torno a cero, que es como se comporta un residuo de cuadratura legítimo.

El origen del término es puramente geométrico y admite forma cerrada. Sustituyendo la ecuación (5.30) en la definición de p_{out} ,

$$\underbrace{\sum_x v_{c,x} i_{o,x}}_{\text{en el nodo}} = \underbrace{\sum_x v_{Cf,x} i_{o,x}}_{\text{sobre la señal registrada}} + R_{fc} \sum_x i_{c,x} i_{o,x}, \quad (5.34)$$

y el último sumando es lo que faltaba. Vale −1126 W sobre 18 kW en la condición nominal, un 6.3 %, y escala con el producto de la corriente capacitiva por la de salida, lo que explica que crezca en la familia de impedancia característica constante, donde C_f aumenta, y sea despreciable en la de resonancia fija con C_f reducida.

Con eso quedan cerradas las dos preguntas de fondo.

- **¿Queda fuera algún elemento disipativo? No.** El volumen va desde la entrada del puente hasta el nodo de la rama capacitiva. El puente se construye en los dos modelos con interruptores ideales, sin resistencia de conducción ni descripción térmica, y el inductor y la rama capacitiva entran en la ecuación (5.28) con sus resistencias serie. La línea y la carga quedan fuera porque la salida se evalúa en ese nodo, y la resistencia virtual no disipa por ser un término de la ley de control.
- **¿El residuo procede de la tasa de registro? Solo en el esquema modulado.** Allí la mediana queda entre 1.58 y 2.29 %, coherente con la reactancia espuria de 1.9° que el ajuste del punto de medida ya reveló, equivalente a medio periodo de muestreo. En el conjunto finito, cuyo *ripple* de enlace es cuatro veces mayor, el residuo es un orden de magnitud menor, de modo que el *ripple* **no** es la variable que lo gobierna.

Las conclusiones que siguen son comparativas. Con la salida evaluada en el nodo, las magnitudes del Escenario 1 se leen sin banda de incertidumbre apreciable, y las del Escenario 2 con la del dos por ciento que la tabla declara.

5.7.3. G4, frontera asociada al límite de tensión

El balance de un segundo cuantifica la caída de potencia entregada en G4 y el aumento de disipación capacitiva en G2. Se contrasta con la Tabla 5.3, sin deducir de él otra frontera o una causa única del colapso.

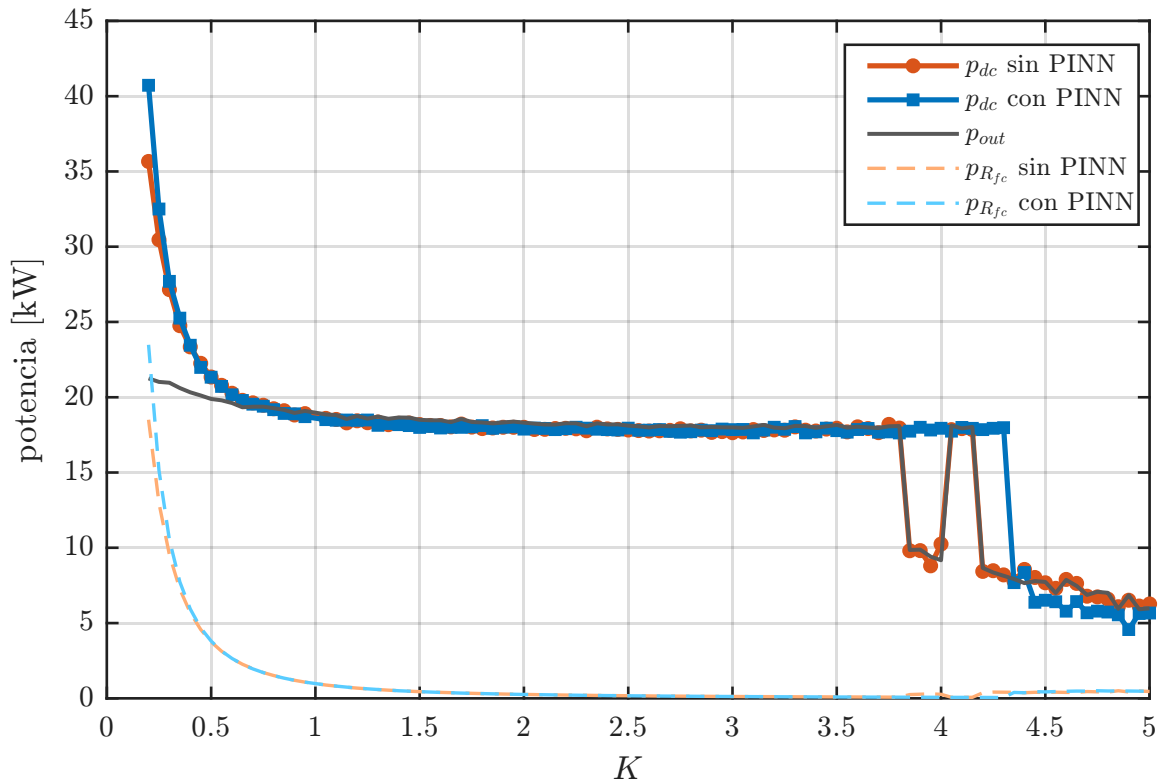


Figura 5.34. Escenario 1, grupo G4, términos del balance energético en modo isla frente al nivel de perturbación.

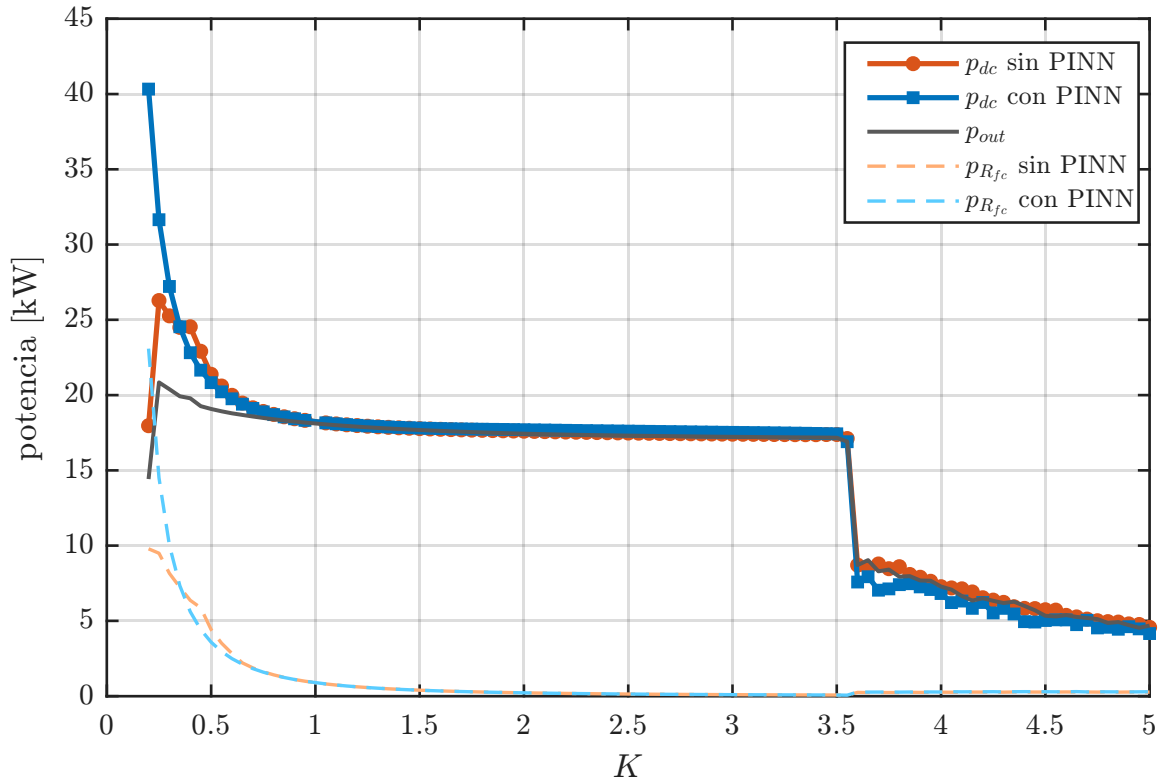


Figura 5.35. Escenario 2, grupo G_4 , términos del balance energético en modo isla.

En la Figura 5.34, con PINN, la salida cae de 17.8 a 6.7 kW entre $K = 4.30$ y 4.35 , mientras la disipación capacitiva pasa de 0.05 a 0.39 kW y los residuos quedan bajo el uno por ciento. Esa pérdida no explica la caída. Sin PINN, $K = 3.90$ y 3.95 son puntos degradados del registro corto, no extremos de la frontera manual.

En el Escenario 2 (Figura 5.35), entre $K = 3.55$ y 3.60 la salida baja de 16.60 a 8.41 kW sin PINN y de 16.39 a 7.33 kW con ella. Las pérdidas capacitivas crecen de 0.069 a 0.250 kW y de 0.064 a 0.274 kW, muy por debajo de la caída de salida. La firma es compatible con pérdida de seguimiento por actuación limitada, sin probar su causa dinámica.

Relación con las fronteras observadas. Balance y RMSE pertenecen a la campaña de un segundo. En G_4 , la referencia manual es $[3.40, 3.45]$ sin PINN y $[3.35, 3.40]$ con ella para el Escenario 2, y $[4.15, 4.20]$ y $[4.25, 4.30]$ para el Escenario 1 (Tabla 5.3). La PINN puede modificar la trayectoria, no la tensión disponible del puente.

5.7.4. G2, la rama capacitiva se convierte en la carga dominante

La familia de impedancia característica constante presenta el comportamiento opuesto al anterior, y su lectura exige seguir dónde acaba la potencia que el enlace de continua entrega de más, porque no es la carga quien la recibe.

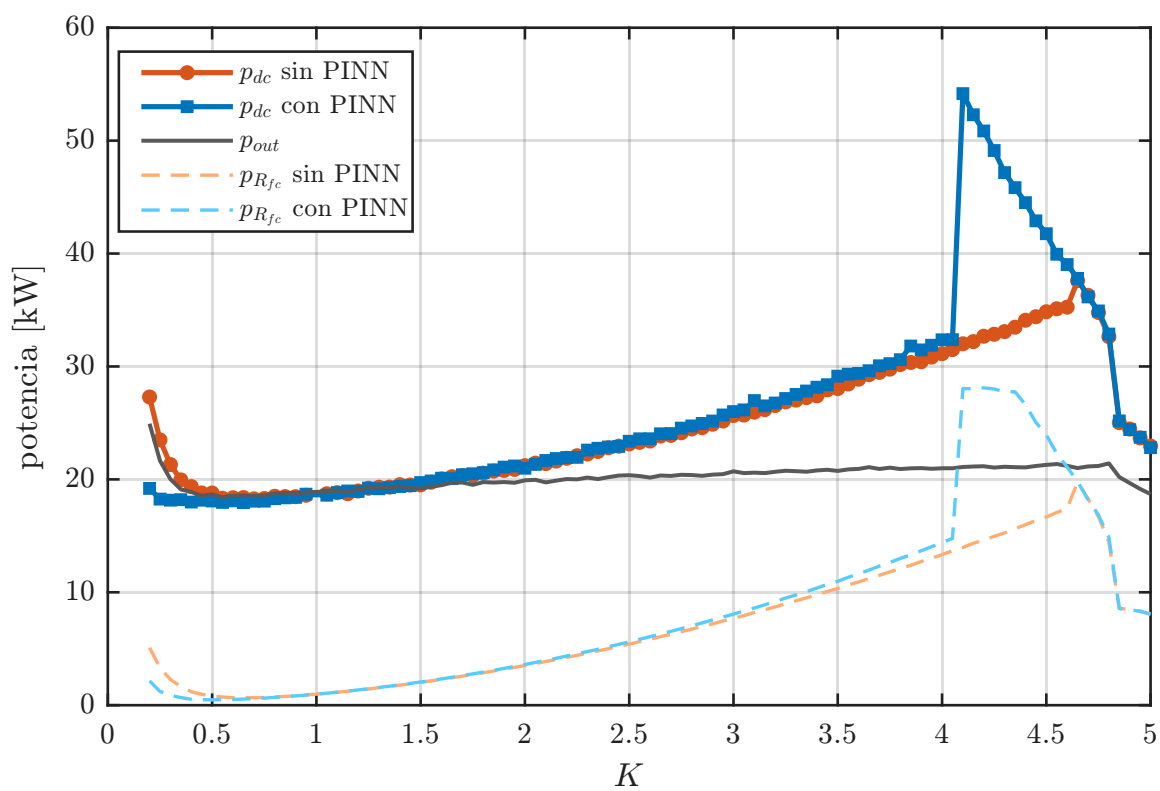


Figura 5.36. Escenario 1, grupo G2, términos del balance energético en modo isla frente al nivel de perturbación.

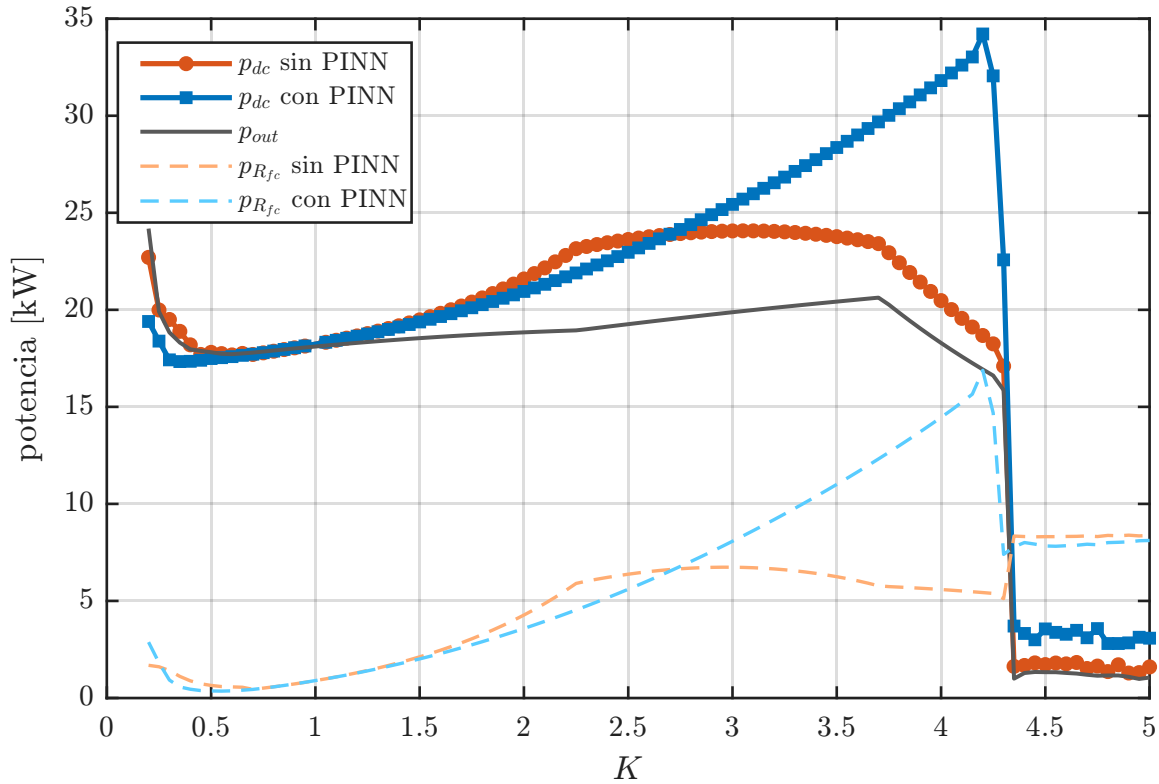


Figura 5.37. Escenario 2, grupo G2, términos del balance energético en modo isla.

La Figura 5.36 muestra el comportamiento opuesto de G2. La potencia que llega a la carga permanece en torno a 18 kW en todo el barrido, mientras la que el enlace de continua debe entregar crece de forma monótona, de 21.2 kW en $K = 2$ hasta 35.3 kW en $K = 4.60$ en la configuración nominal, y hasta 39.0 kW en la corregida, que sostiene un nivel de energía circulante mayor. La diferencia no se pierde en el inductor, cuya pérdida es de unos cientos de watts. Aparece íntegra en la rama capacitiva, y admite una forma cerrada.

Con PINN, entre $K = 2$ y 4.10 del Escenario 2 (Figura 5.37), la entrada aumenta de 20.95 a 32.61 kW y la salida permanece entre 16.89 y 16.79 kW. La pérdida inductiva pasa de 0.076 a 0.290 kW, frente a 3.58 y 15.24 kW de la capacitiva. Sin PINN, la entrada cae de 24.01 kW en $K = 2.85$ a 19.56 kW en 4.10. La corrección sostiene la salida durante más niveles del registro corto, distinto de la observación a quince segundos.

La ley de disipación de la rama capacitiva. En este grupo la capacitancia crece con el nivel, de modo que la impedancia de la rama cae y su corriente crece en la misma proporción. Como la disipación es cuadrática en esa corriente, la pérdida de la rama crece con el *cuadrado* del nivel de perturbación,

$$P_{R_{fc}}(K) = \frac{3}{2} R_{fc} \left| \frac{v_{c,pk}}{Z_C(K)} \right|^2, \quad Z_C(K) = R_{fc} - \frac{j}{\omega_{nom} C_f K}, \quad (5.35)$$

que en el régimen en que la reactancia domina sobre la resistencia serie se reduce a la forma compacta

$$P_{R_{fc}}(K) \simeq \frac{3}{2} R_{fc} (\omega_{nom} C_f v_{c,pk})^2 K^2 = 0.896 K^2 \text{ kW}, \quad (5.36)$$

con los valores nominales $R_{fc} = 0.5 \Omega$, $C_f = 500 \mu\text{F}$ y $v_{c,pk} = 220 \text{ V}$. La Tabla 5.13 contrasta la ecuación (5.36) contra la pérdida medida en la campaña, sobre la variante sin corrección del Escenario 1 en modo isla.

Tabla 5.13

VERIFICACIÓN DE LA LEY DE DISIPACIÓN DE LA RAMA CAPACITIVA. GRUPO G2, MODO ISLA, ESCENARIO 1, SIN CORRECCIÓN.

K	$C_f K$ [μF]	ecuación (5.36) [kW]	medido [kW]	desviación
1.05	525	0.99	1.06	7 %
2.00	1000	3.58	3.52	2 %
3.00	1500	8.06	7.70	5 %
4.00	2000	14.33	13.33	7 %
4.50	2250	18.14	16.67	9 %

La ley supone tensión sinusoidal nominal, mientras el registro incluye amplitud efectiva y armónicos. Su dependencia cuadrática con la tensión explica la sensibilidad de la aproximación, sin aislar toda la desviación.

En $K = 4.50$ del Escenario 1 sin PINN, la diferencia entrada-salida es 17.08 kW y la rama capacitiva disipa 16.67 kW. El resto reúne pérdidas inductivas, variación de energía y un residuo de -0.013% de la potencia del enlace. Se comprueba el predominio capacitivo, no un umbral de divergencia.

Qué significa el nivel crítico en valores físicos. El factor de perturbación oculta la magnitud del cambio, de modo que conviene traducirlo. La Tabla 5.14 recorre el barrido en unidades del componente.

Tabla 5.14

TRADUCCIÓN DEL NIVEL DE PERTURBACIÓN DE G2 A VALORES FÍSICOS DEL FILTRO. LA IMPEDANCIA CARACTERÍSTICA SE CONSERVA POR CONSTRUCCIÓN DEL GRUPO.

K	L_f [mH]	C_f [μF]	f_{res} [Hz]	Z_0 [Ω]	$i_{C,pk}$ [A]	$P_{R_{fc}}$ [kW]
1.00	3.00	500	129.9	2.45	34.5	0.89
2.00	6.00	1000	65.0	2.45	68.3	3.50
2.60	7.80	1300	50.0	2.45	88.0	5.81
3.00	9.00	1500	43.3	2.45	100.9	7.64
3.95	11.85	1975	32.9	2.45	130.4	12.75
4.50	13.50	2250	28.9	2.45	146.6	16.12

En el entorno de la frontera el inductor ha pasado de 3 a 12 mH y el condensador de 500 a 2000 μF . La corriente que el condensador demanda a la frecuencia fundamental pasa de 34.5 a 130 A de valor máximo instantáneo, frente a los 75 A que el maestro entrega a su cuota de carga. **El filtro deja de ser un filtro y se convierte en la carga dominante del convertidor**, y esa es la lectura física del colapso de G2.

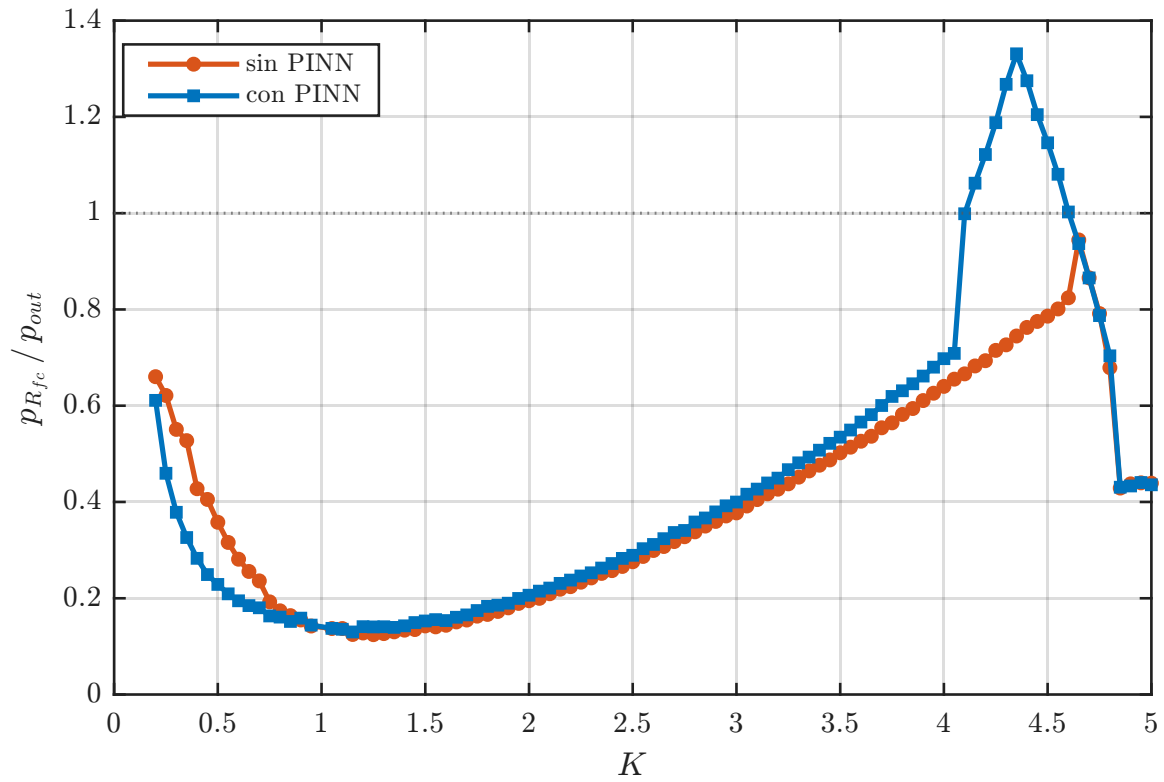


Figura 5.38. Escenario 1, grupo G2, razón entre la potencia disipada en la rama capacitiva y la que llega a la carga, modo isla. La línea de puntos marca la paridad.

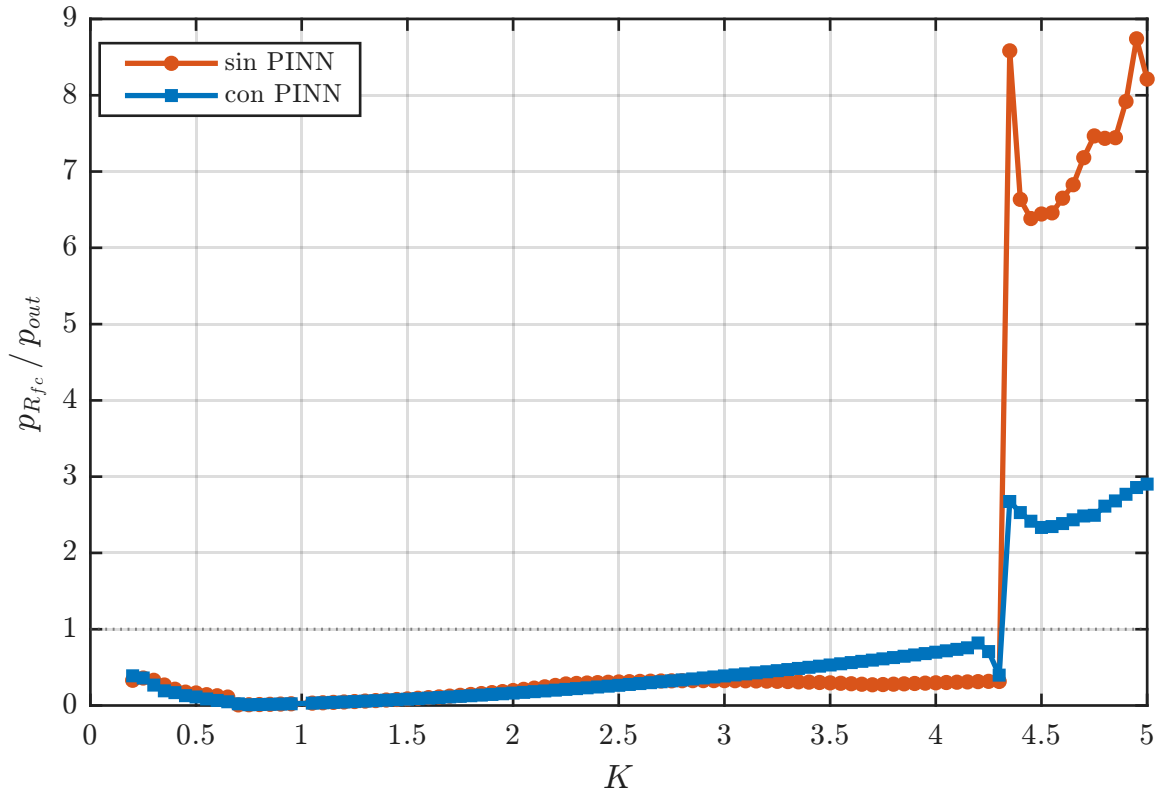


Figura 5.39. Escenario 2, grupo G2, razón entre la potencia disipada en la rama capacitiva y la entregada a la carga, modo isla.

La Figura 5.38 cuantifica la razón entre la potencia que la resistencia serie de la rama capacitiva *disipa* y la que llega al punto de acople común, $p_{R_{fc}}/p_{out}$. La magnitud graficada no es la potencia reactiva que circula por el condensador, sino la fracción que efectivamente se resta del balance. En el Escenario 1 y sin corrección esa razón pasa de 0.199 en $K = 2$ a 0.990 en $K = 4.60$. Con PINN supera la paridad en $K = 4.10$ (1.094) y alcanza 1.473 en 4.30. El cociente de potencias positivas crece por mayor pérdida o menor salida, y describe reparto energético, no divergencia.

En el Escenario 2 (Figura 5.39), entre $K = 2$ y 4.10 la razón pasa de 0.212 a 0.907 con PINN y de 0.256 a 0.399 sin ella. Son valores del registro corto, no indicadores de supervivencia a quince segundos.

En $K = 4.35$ la salida se invierte: -6.88 kW sin PINN y -4.67 kW con ella, con residuos de -7.1% y -1.7% (Tabla 5.15). Se informan potencias dimensionales, pues el cociente ya no representa una fracción entregada. Un residuo pequeño también puede aparecer en transitorios al incluir la energía almacenada, y no prueba régimen ni estabilidad.

Hasta dónde llega la ley, y por qué no se propone un umbral general. La ecuación (5.36) estima disipación con tensión sinusoidal sostenida, no estabilidad. En $K = 3.95$ y 4.225 entrega 12.75 y 14.40 kW, equivalentes al 73 y 82% de la cuota nominal del maestro. El primero es un punto ilustrativo de la ley, y solo 4.225 coincide con el punto medio de la frontera G2 del Escenario 2 con PINN, [4.20, 4.25]. Para el Escenario 1 se adoptan [4.05, 4.10] con PINN y [4.60, 4.65] sin ella, según la Tabla 5.3.

El balance demuestra una carga disipativa importante. Separar el efecto de polos, saturación y su interacción requiere otro ensayo, y no se deduce del crecimiento K^2 .

Tabla 5.15
BALANCE ENERGÉTICO EN MODO ISLA.

Esc.	Grupo, variante	K	p_{dc} [kW]	p_{out} [kW]	$p_{R_{fc}}$ [kW]	$p_{R_{fc}}/p_{out}$	ε [%]
1	G2, sin PINN	2.00	21.2	17.6	3.52	0.199	-0.1
1	G2, sin PINN	4.60	35.3	17.6	17.42	0.990	+0.1
1	G2, con PINN	2.00	21.0	17.5	3.60	0.206	+0.1
1	G2, con PINN	4.60	39.0	17.5	21.08	1.202	-0.0
1	G4, sin PINN	3.90	9.8	9.4	0.27	0.029	+0.7
1	G4, sin PINN	3.95	8.8	9.0	0.29	0.033	-0.6
1	G4, con PINN	4.30	18.0	17.8	0.05	0.003	-0.3
1	G4, con PINN	4.35	7.7	6.7	0.39	0.059	+0.6
2	G2, sin PINN	2.00	21.6	16.7	4.27	0.256	+2.4
2	G2, sin PINN	4.25	18.2	12.6	5.39	0.426	+0.3
2	G2, sin PINN	4.35	1.6	-6.9	8.34	—	-7.1
2	G2, con PINN	2.00	20.9	16.9	3.58	0.212	+1.9
2	G2, con PINN	4.30	22.6	15.3	7.40	0.483	+0.5
2	G2, con PINN	4.35	3.7	-4.7	7.79	—	-1.7
2	G4, sin PINN	3.55	17.1	16.6	0.07	0.004	+2.0
2	G4, sin PINN	3.60	8.7	8.4	0.25	0.030	+0.5
2	G4, con PINN	3.55	16.9	16.4	0.06	0.004	+1.9
2	G4, con PINN	3.60	7.6	7.3	0.27	0.037	+0.1

Las potencias son medias sobre la ventana de régimen, la de salida evaluada en el nodo según la ecuación (5.30), y ε es el residuo relativo de la ecuación (5.32). La tabla promedia los últimos cuatro ciclos (80 ms) de registros de un segundo y conserva la selección energética histórica, recalculada desde los CSV finales. Sus filas no son fronteras, por lo que $K = 3.55$ y 3.60 en G4 del Escenario 2 no reemplazan los límites manuales de la Tabla 5.3. Las potencias pertenecen a esa ventana corta. Los residuos alcanzan 2.4 % con salida positiva y -7.1 % en una fila con salida negativa.

Las dos filas de $K = 4.35$ del Escenario 2 merecen una lectura aparte, porque su potencia de salida es **negativa**. No es un artefacto. En esos dos puntos la rama capacitiva disipa 8.34 y 7.79 kW mientras el enlace de continua aporta 1.6 y 3.7 kW, de modo que la diferencia entra desde la microrred hacia el filtro. El convertidor deja de entregar y pasa a absorber para sostener sus propias pérdidas, que es la forma cuantitativa de la afirmación de que el filtro se ha convertido en una carga. La razón $p_{R_{fc}}/p_{out}$ pierde sentido con el denominador negativo y por eso no se tabula en esas dos filas. Evaluar la potencia en el condensador tampoco resuelve el cociente, pues el denominador próximo a cero produce valores grandes sin implicar mayor disipación.

5.7.5. Síntesis de la evidencia energética

La Tabla 5.15 distingue caída de salida sin pérdida equivalente en G4 e incremento

de pérdidas capacitivas en G2. La ley cuadrática explica esta última tendencia bajo sus supuestos, no todo el transitorio posterior.

Esa separación tiene además un respaldo independiente del criterio de tensión. En G2 el índice de modulación solicitado vale 0.655 antes del colapso, muy por debajo de la saturación, de modo que el límite de tensión no es la restricción activa en ese punto. G4 presenta una firma compatible con agotamiento del margen de tensión, mientras G2 presenta una carga interna capacitiva creciente antes de saturar la modulación. Son mecanismos dominantes distintos en los casos observados, sin afirmar que constituyan una explicación dinámica exhaustiva.

El aporte de la corrección paramétrica se lee en la misma tabla. En G2 del Escenario 2, la corrección sostiene la potencia durante más niveles de la campaña corta. El residuo alcanza 2.4 % con salida positiva, como recoge la Tabla 5.15.

Solo se interpreta $p_{R_{fc}}/p_{out}$ con salida positiva y alejada de cero. En las dos últimas filas se informan potencias y sentido del flujo, para evitar que un denominador negativo o pequeño distorsione la lectura. En estas condiciones la corrección no elimina el mecanismo asociado a la planta, pero el umbral observado se desplaza y su manifestación energética se atenúa.

Dos limitaciones acotan el alcance. La ventana de campaña es de un segundo, de modo que las afirmaciones son de ausencia de divergencia dentro de esa ventana y no de estabilidad asintótica, con el matiz que la Sección 5.1.6 desarrolla. Y el residuo conserva el sesgo de cuadratura ya descrito, que es común a todas las corridas y no altera ninguna comparación.

5.8. Evaluación del sistema ante variaciones de consigna de potencia

Las campañas anteriores modifican el filtro con el despacho fijo. Esta sección conserva cada condición física y recorre el punto de operación. El ensayo comprueba el reparto entre las tres unidades, el intercambio con la red externa y la capacidad de la PINN para responder al desajuste del modelo sin confundirlo con una variación de potencia.

5.8.1. Diseño del ensayo

Las potencias se expresan sobre una base común igual a la demanda activa nominal,

$$S_b = P_b = Q_b = P_{carga}^{nom} = 35.01 \text{ kVA}. \quad (5.37)$$

Con esta elección la carga vale $P_{carga} = 1.000$ pu y $Q_{carga} = 1.007$ pu. Su potencia aparente es 49.68 kVA y su factor de potencia es 0.705. Los niveles del barrido se definen mediante

$$(P) = \frac{P_{sist}^{ref}}{S_b}, \quad (Q) = \frac{Q_{sist}^{ref}}{S_b}, \quad (5.38)$$

y recorren $\{0.25, 0.50, 0.75, 1.00, 1.50, 2.00\}$ pu. La escalera principal aplica el mismo

factor a las consignas activas y reactivas de las tres unidades. La pequeña diferencia entre (P) y (Q) proviene del factor de potencia de la carga y no de una segunda base.

El maestro recibe la mitad de la solicitud y cada esclavo un cuarto. Las fracciones siguen la capacidad relativa de corriente de las unidades y suman exactamente uno. En el nivel unitario resultan las consignas de la Tabla 5.16.

Tabla 5.16
REPARTO NOMINAL Y CAPACIDAD DE LAS UNIDADES.

Unidad	Fracción	P^{ref} [kW]	Q^{ref} [kVAr]	$I_{m\acute{a}x}$ [A]	$S_{m\acute{a}x}$ [kVA]
Maestro	1/2	17.51	17.62	250	82.50
Esclavo 1	1/4	8.75	8.81	100	33.00
Esclavo 2	1/4	8.75	8.81	100	33.00
Sistema	1	35.01	35.24	—	—

La única limitación aplicada a la consigna es la capacidad aparente de cada convertidor. El fasor se escala mediante

$$S_u^{ref} = \sqrt{[\max(P_u^{ref}, 0)]^2 + (Q_u^{ref})^2}, \quad \kappa_u = \min\left(1, \frac{S_{u,m\acute{a}x}}{S_u^{ref}}\right), \quad S_{u,m\acute{a}x} = \frac{3}{2} \widehat{V}_{nom} I_{m\acute{a}x,u}. \quad (5.39)$$

El máximo solicitado es 49.7 kVA para el maestro y 24.8 kVA para cada esclavo. Ambos permanecen por debajo de sus capacidades, por lo que $\kappa_u = 1$ en los seis niveles. En modo conectado a la red, un valor menor que uno hace que la red aporte el déficit. En uno el flujo activo queda próximo a cero y sobre uno la red absorbe el excedente. En modo isla el maestro forma tensión y frecuencia. Los esclavos reciben el residuo entre la carga filtrada y la participación del maestro,

$$P_{s,isla}^{ref} = \max\left(\frac{P_{carga,f} - P_{m,f}^{ref}}{N}, 0\right). \quad (5.40)$$

Por ello la escalera modifica el reparto interno en isla, pero no la potencia de la carga.

La campaña principal cruza siete condiciones físicas, dos modos, dos escenarios y las variantes sin y con PINN. Son 56 simulaciones, cada una con seis tramos de consigna. Los ensayos complementarios añaden 50 corridas con puntos congelados para separar los canales, registrar la entrada de la red y comprobar el cierre del sistema. Las condiciones se indican en la Tabla 5.17. El filtro liviano y el filtro pesado se muestran como ensayos de esfuerzo, pero no ingresan en las medianas ni en los recuentos principales porque exceden la envolvente física establecida en las Secciones 5.5 y 5.6.

Tabla 5.17
CONDICIONES FÍSICAS EMPLEADAS EN EL BARRIDO DE CONSIGNAS.

Condición	K_{Lf}	K_{Cf}	Familia	Uso en el resumen
Nominal	1.00	1.00	origen	incluida
Filtro liviano	0.20	5.00	G4 inversa	ensayo de esfuerzo
Filtro pesado	5.00	0.20	G4 directa	ensayo de esfuerzo
Capacitancia reducida	1.00	0.20	G3 inversa	incluida
Inductancia reducida	0.60	1.00	G1 inversa	incluida
Resonancia desplazada	1.50	1.50	G2 directa	incluida
Desajuste moderado	1.50	0.67	G4 directa	incluida

Los conjuntos de entrenamiento de ambos escenarios cubren $(P) \in [0.25, 2.00]$ y $(Q) \in [-1.00, 2.00]$. Por tanto, ninguna columna de consigna constituye extrapolación. Esta precisión permite atribuir una variación de los factores identificados a la sensibilidad del estimador dentro de su dominio de ajuste y no a una consigna ausente durante el entrenamiento.

5.8.2. Capacidad efectiva de despacho y seguimiento de las consignas

El análisis distingue la solicitud del maestro, la potencia que entrega cada unidad y el intercambio con la red. El balance en el punto de acople común se comprueba mediante

$$\begin{aligned}
 P_{\text{PCC}} &= P_m + \sum_{j=1}^N P_{o,j} + P_{\text{red}} = P_{\text{carga}}, \\
 Q_{\text{PCC}} &= Q_m + \sum_{j=1}^N Q_{o,j} + Q_{\text{red}} = Q_{\text{carga}}.
 \end{aligned} \tag{5.41}$$

Las potencias del maestro se calculan con la tensión del condensador y la corriente de filtro según la ecuación (4.21). El seguimiento se cuantifica con las variables ya empleadas en el capítulo,

$$e_P = P_m^{\text{ref}} - P_m, \quad e_Q = Q_m^{\text{ref}} - Q_m, \quad \eta_P = \frac{P_m}{P_m^{\text{ref}}}, \quad \eta_Q = \frac{Q_m}{Q_m^{\text{ref}}}. \tag{5.42}$$

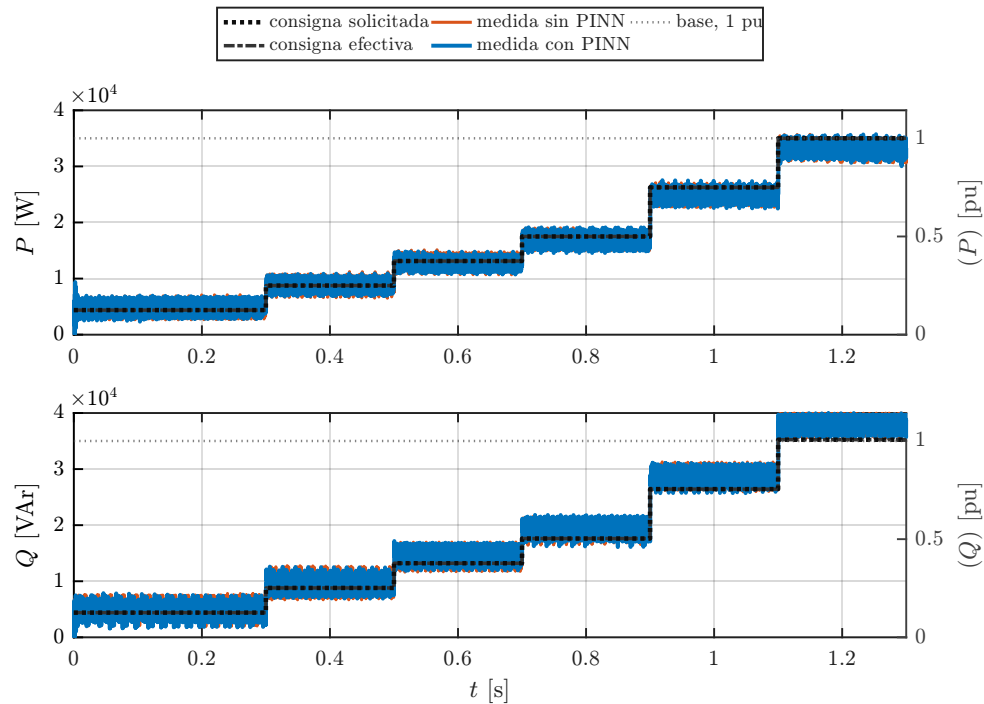


Figura 5.40. *Escenario 1, seguimiento de las consignas activa y reactiva del maestro.*

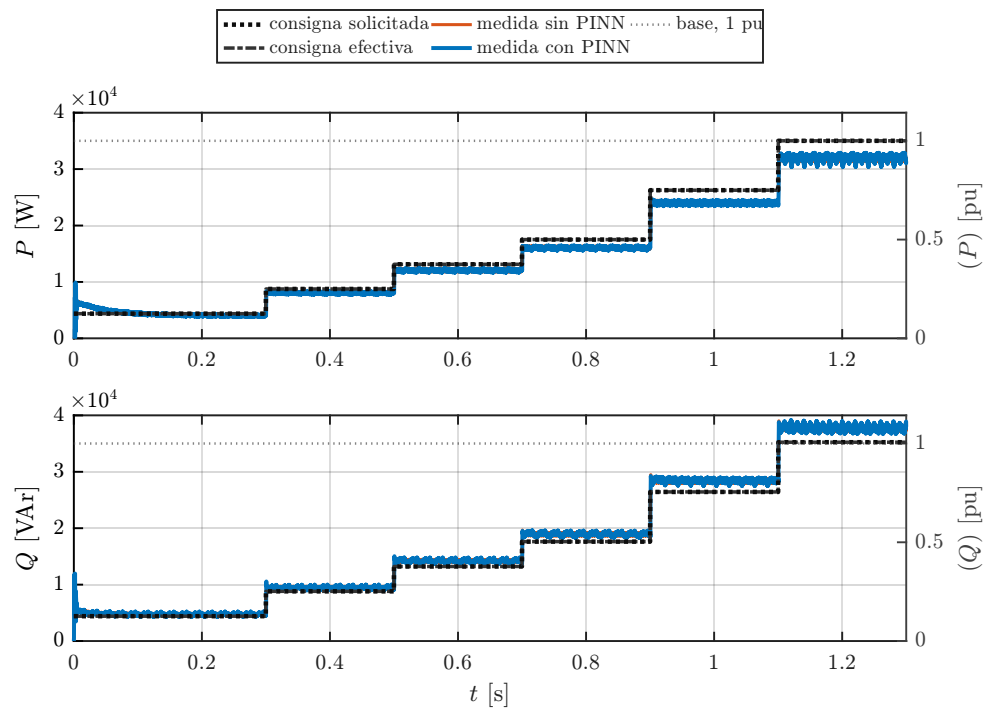


Figura 5.41. *Escenario 2, seguimiento de las consignas activa y reactiva del maestro.*

La Figura 5.40 muestra los seis niveles en la condición nominal y en modo conectado a la red. La consigna solicitada y la efectiva se superponen, por lo que la saturación de

la ecuación (5.39) no interviene. Las respuestas sin y con PINN también permanecen superpuestas. Este resultado es el esperado sobre una planta sin desajuste y confirma que activar la corrección no modifica el recorrido de despacho.

Tabla 5.18
MÉTRICAS DE SEGUIMIENTO DEL MAESTRO EN LOS DOS ESCENARIOS.

$(P) = (Q)$ [pu]	Escenario 1				Escenario 2			
	e_P [W]	η_P	e_Q [VAr]	η_Q	e_P [W]	η_P	e_Q [VAr]	η_Q
0.25	-524	1.120	-861	1.195	342	0.922	-331	1.075
0.50	-182	1.021	-976	1.111	716	0.918	-665	1.075
0.75	165	0.987	-1206	1.091	1092	0.917	-986	1.075
1.00	590	0.966	-1499	1.085	1478	0.916	-1300	1.074
1.50	1440	0.945	-1868	1.071	2275	0.913	-1912	1.072
2.00	2146	0.939	-2582	1.073	3114	0.911	-2497	1.071

En el Escenario 1, η_P baja de 1.120 a 0.939 al aumentar el despacho, y pasa de exceso inicial a déficit. La reactiva supera la consigna y η_Q se acerca a uno. La referencia efectiva coincide con la solicitada, por lo que no hay recorte de consigna. El Escenario 2 mantiene la progresión con menor *ripple*, y la superposición sin y con PINN indica una aportación pequeña en el nominal.

En la Tabla 5.18, η_P permanece entre 0.911 y 0.922 y η_Q entre 1.071 y 1.075. La estabilidad de ambas razones muestra un sesgo de régimen prácticamente proporcional al despacho, no una pérdida progresiva de capacidad. En 2 pu el maestro entrega 31.90 kW y la generación conjunta alcanza 67.62 kW. El sistema supera la demanda y obliga a invertir el flujo de potencia activa de la red.

5.8.3. Flujo de potencia en la red externa

La red externa actúa como nodo de holgura. La referencia ideal del intercambio se obtiene al restar la consigna conjunta de la demanda,

$$P_{\text{red}}^{\text{ideal}} = P_{\text{carga}}^{\text{nom}} - P_{\text{sist}}^{\text{ref}}, \quad Q_{\text{red}}^{\text{ideal}} = Q_{\text{carga}}^{\text{nom}} - Q_{\text{sist}}^{\text{ref}}. \quad (5.43)$$

Tabla 5.19
POTENCIA EN LA ENTRADA DE LA RED DURANTE EL BARRIDO PRINCIPAL.

$(P) = (Q)$ [pu]	ideal		Escenario 1		Escenario 2	
	P [kW]	Q [kVAr]	P [kW]	Q [kVAr]	P [kW]	Q [kVAr]
0.25	26.26	26.43	25.72	25.32	25.45	24.96
0.50	17.51	17.62	17.31	15.70	17.15	15.99
0.75	8.75	8.81	8.99	7.87	8.88	7.02
1.00	0	0	0.60	-1.95	0.65	-1.95
1.50	-17.51	-17.62	-15.89	-19.31	-15.75	-19.98
2.00	-35.01	-35.24	-31.78	-37.78	-31.95	-37.97

La Tabla 5.19 confirma los tres regímenes en ambos canales. Por debajo del nivel

unitario la red cubre el déficit. En la unidad el intercambio activo se reduce a 0.60 kW y 0.65 kW. Sobre la unidad la red absorbe el excedente. La diferencia respecto de la ecuación (5.43) reúne las pérdidas de filtros y líneas, además del intercambio reactivo de las ramas capacitivas. Por ello el cruce reactivo se adelanta ligeramente respecto del activo.

Para observar la inversión de fase sin mover simultáneamente ambos canales, la serie de activa recorre los seis niveles con $(Q) = 1$ pu. La Figura 5.42 utiliza una escala común para todos los paneles.

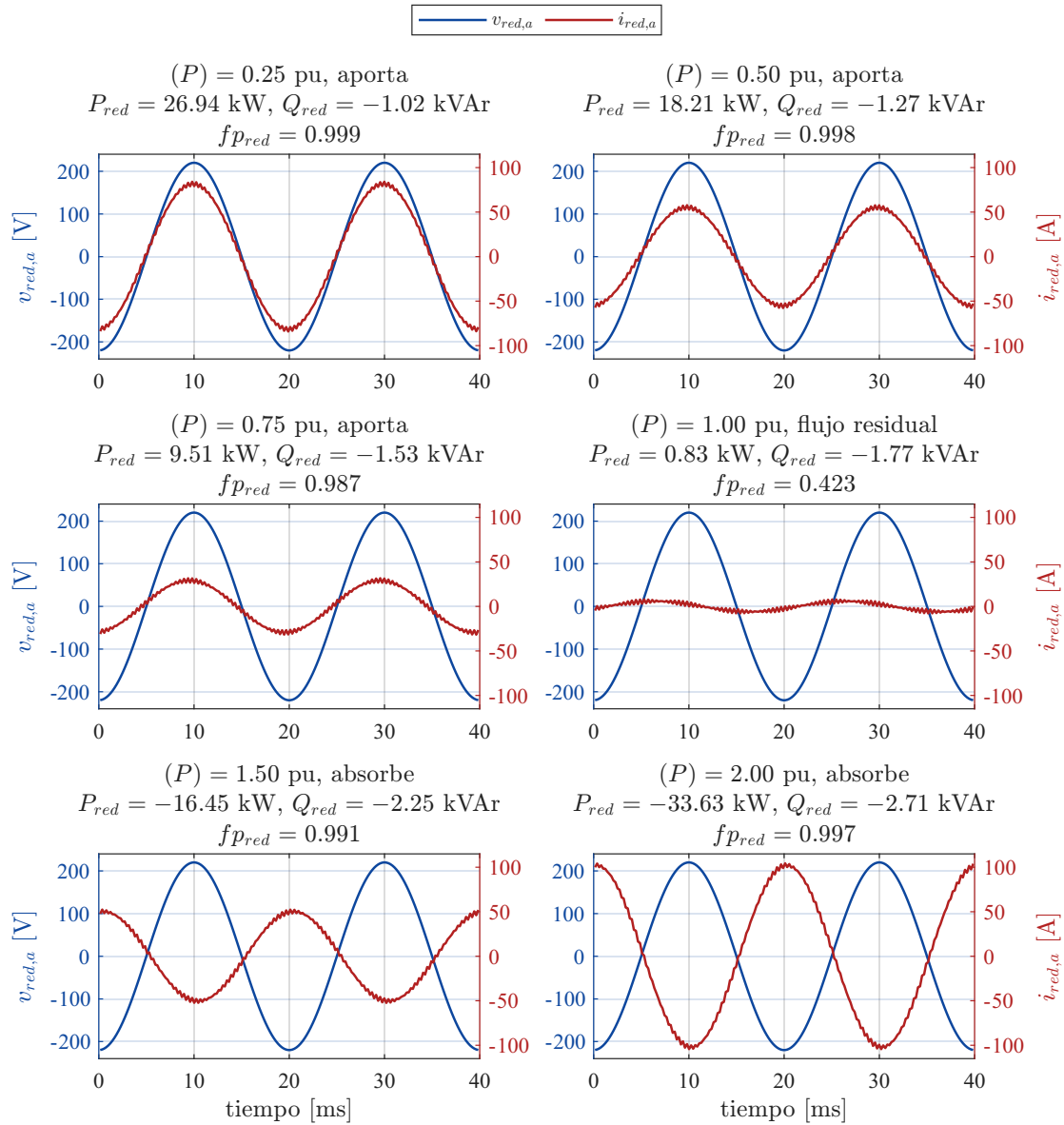


Figura 5.42. Tensión y corriente de red en los seis niveles de la serie activa.

En 0.25, 0.50 y 0.75 pu la red aporta 26.94 kW, 18.21 kW y 9.51 kW. En el nivel unitario queda un flujo activo residual de 0.83 kW. En 1.50 y 2.00 pu la corriente invierte su fase y la red absorbe 16.45 kW y 33.63 kW. El intercambio reactivo permanece entre -1.02 kVAr y -2.71 kVAr porque esa consigna se mantiene fija. El factor de potencia visto desde la red

es superior a 0.987 salvo en el nivel unitario. Allí cae a 0.423 porque la componente activa se aproxima a cero mientras subsiste el intercambio reactivo de los filtros. No representa un deterioro del factor de potencia de la carga.

Las series cruzadas completan la separación. Una recorre (P) con (Q) = 1 pu y la otra recorre (Q) con (P) = 1 pu, siempre sobre la condición nominal del Escenario 2.

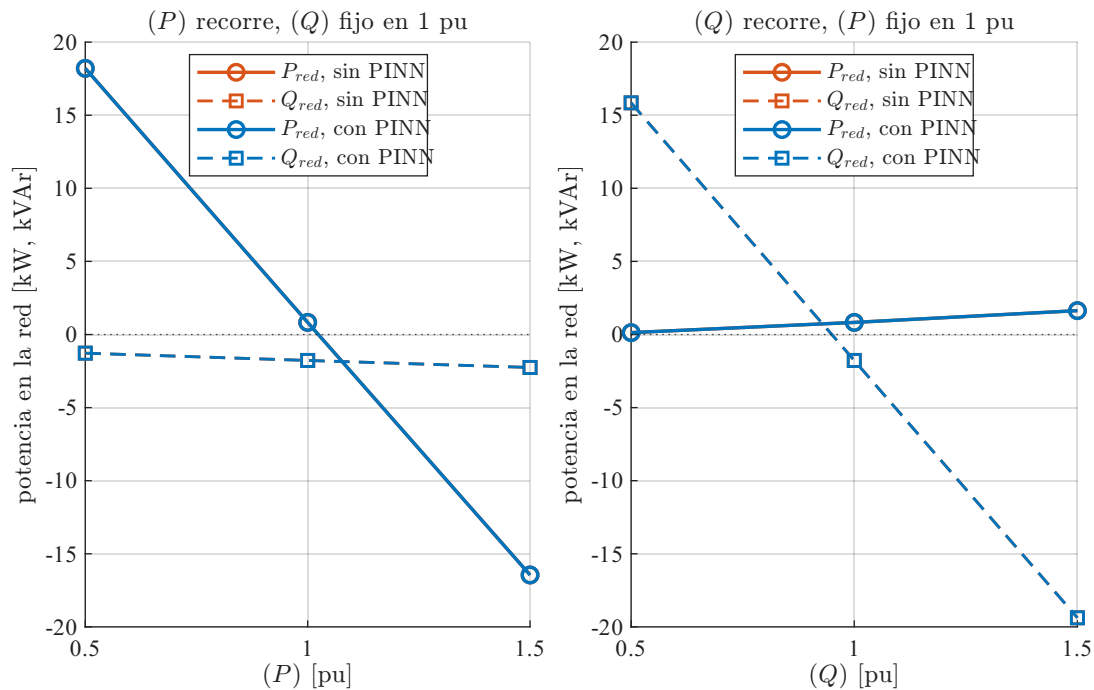


Figura 5.43. Separación de los canales activo y reactivo en la entrada de la red.

La Figura 5.43 muestra que, al recorrer la activa, P_{red} cambia de signo mientras Q_{red} conserva un residuo pequeño. Al recorrer la reactiva ocurre el comportamiento complementario. Las curvas sin y con PINN se superponen porque el filtro permanece nominal, resultado coherente con las figuras de seguimiento.

Tabla 5.20
POTENCIAS DE RED EN LAS SERIES CRUZADAS.

Serie	Magnitud	0.50 pu	1.00 pu	1.50 pu
(P) variable, (Q) = 1	P_{red} [kW]	18.21	0.83	-16.45
	Q_{red} [kVAr]	-1.27	-1.77	-2.25
(Q) variable, (P) = 1	P_{red} [kW]	0.10	0.83	1.60
	Q_{red} [kVAr]	15.8	-1.8	-19.4

La Tabla 5.20 cuantifica el acoplamiento residual. La serie activa recorre 34.66 kW y desplaza la reactiva menos de 1 kVAr. La serie reactiva recorre 35.2 kVAr y desplaza la activa 1.5 kW. El ensayo no establece un desacoplamiento exacto, pero sí confirma que el canal fijado varía poco frente al recorrido del canal gobernado.

5.8.4. Robustez de la identificación sobre el despacho

La especificidad exige que la PINN responda al desajuste del filtro y no al punto de despacho. Dentro de cada fila los parámetros físicos permanecen fijos. El recorrido relativo se calcula con la notación ya empleada,

$$\Delta_\rho = \frac{\text{máx } \rho - \text{mín } \rho}{\text{media}(\rho)} 100 \%. \quad (5.44)$$

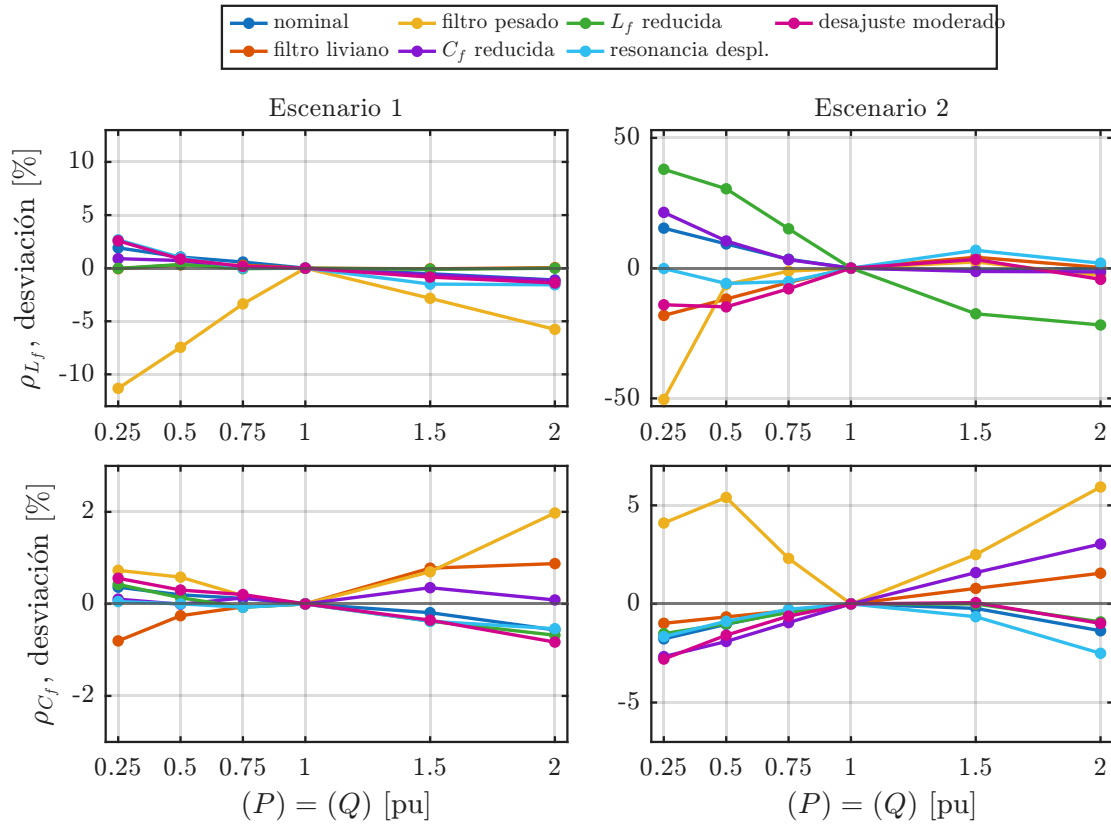


Figura 5.44. Desviación de los factores identificados respecto de la estimación en $(P) = 1 \text{ pu}$.

La Figura 5.44 representa la desviación respecto del valor estimado en $(P) = 1 \text{ pu}$, mientras la Tabla 5.21 usa el recorrido de la ecuación (5.44). Por ello el recorrido visual de una curva y el índice agregado no son la misma magnitud. Cada panel conserva su propia escala vertical. Los trazos discontinuos identifican los dos ensayos de esfuerzo excluidos de la síntesis.

Tabla 5.21

RECORRIDO DE LA IDENTIFICACIÓN SOBRE UNA PLANTA CONSTANTE.

Escenario	ΔP_m	Mediana $\Delta_{\rho_{Lf}}$	Peor	Mediana $\Delta_{\rho_{Cf}}$	Peor
1, FCS-MPC	164.51 %	3.01 %	11.93 %	1.10 %	1.96 %
2, MPC modulado	174.07 %	21.67 %	58.50 %	2.54 %	5.74 %

El Escenario 1 mantiene ambos factores próximos a una trayectoria plana. En el Escenario 2 el canal capacitivo también permanece acotado, pero ρ_{Lf} alcanza un recorrido mediano de 21.67 % y un peor caso de 58.50 %. La desviación cercana a ± 40 % que se observa en el panel inductivo pertenece a condiciones concretas y no a todas las filas. Aun así, su magnitud es demasiado alta para presentar la identificación de L_f como independiente del despacho.

La serie activa nominal permite separar esta lectura del cambio simultáneo de Q . Sus factores se muestran en la Tabla 5.22.

Tabla 5.22
FACTORES IDENTIFICADOS DURANTE LA SERIE ACTIVA NOMINAL.

Factor	(P) [pu]						Δ_ρ
	0.25	0.50	0.75	1.00	1.50	2.00	[%]
ρ_{Lf}	1.0665	1.0128	0.9719	0.9473	0.9365	0.9506	13.26
ρ_{Cf}	1.0084	1.0121	1.0150	1.0162	1.0131	1.0033	1.28

Con (Q) fijo, ρ_{Lf} todavía recorre un 13.26 %, mientras ρ_{Cf} cambia solo 1.28 %. El resultado confirma que la sensibilidad no exige mover ambos canales, aunque la combinación de consigna y condición física es la que produce los recorridos mayores de la Tabla 5.21.

La corrección del predictor y los pesos aprendibles de la lbPINN resolvieron dos problemas distintos. El primer cambio hizo coherente el modelo discreto con la tensión del condensador. El segundo evitó fijar de antemano la importancia relativa de los términos de pérdida. Ninguno de ellos impone que la salida sea invariante respecto de (P) y (Q). Además, las consignas forman parte de las entradas de la red y el esquema modulado añade PWM, retención, doble actualización y lazos externos que no aparecen íntegramente en la pérdida física reducida.

Dos explicaciones quedan descartadas de entrada. El recorrido no corresponde a una variación real del inductor, porque la planta se mantiene fija, y no corresponde a extrapolación, porque el entrenamiento cubre todo el intervalo. Para separar los mecanismos restantes se ejecutó una ablación específica sobre el mismo modelo y los mismos pesos de esta campaña, con la escalera completa de seis niveles y dos condiciones de filtro, apagando de forma selectiva los dos lazos externos que la pérdida física no representa.

Tabla 5.23
ABLACIÓN DE LOS LAZOS EXTERNOS. RECORRIDO DE ρ_{Lf} A LO LARGO DEL DESPACHO.

Configuración de control	Filtro nominal	$K_{Lf} = 0.6$
Completa	14.99 %	55.32 %
Sin amortiguamiento activo	14.96 %	55.25 %
Sin integrador de corriente de salida	13.49 %	52.89 %
Sin ninguno de los dos	13.88 %	53.51 %

La Tabla 5.23 permite tres lecturas. El amortiguamiento activo no interviene, porque apagarlo mueve el recorrido menos de una décima de punto en las dos condiciones. La saturación del modulador tampoco, porque es nula en las cuarenta y ocho ventanas y el índice recorre de 0.506 a 0.798 sin acercarse al límite. El integrador de la corriente de

salida sí contribuye, pero solo 1.5 y 2.4 puntos, alrededor de una décima parte del efecto, y apagar los dos a la vez no añade nada sobre apagar solo el integrador. **Retirar por completo los lazos externos deja el recorrido en 13.88 % frente a los 14.99 % del control completo**, de modo que no son el origen de la sensibilidad.

El mecanismo que sí resiste el contraste es la excitación disponible. El residuo físico relativo cae de forma monótona al subir el despacho, de 108.59 a 20.99 %, mientras la excitación pasa de 28.88 a 98.97 V. En el nivel más bajo el residuo es tan grande como la propia diferencia entre muestras, de modo que el identificador dispone de muy poca información y su estimación se desplaza.

La interpretación defendible es por tanto que, en el Escenario 2, ρ_{Lf} actúa como un factor efectivo condicionado por la excitación que el punto de operación deja disponible, y no por un lazo de control concreto. El alcance de esta ablación conviene declararlo. Cubre dos condiciones de filtro y los dos lazos externos, no el modulador ni la retención de mando, de modo que acota las causas sin agotarlas. La limitación reduce la fuerza de una afirmación de identificación física absoluta, pero no invalida la evaluación de compensación, que se mide mediante pares con la misma planta y la misma consigna.

5.8.5. Desempeño de la corrección a lo largo del despacho

La mejora de cada celda conserva la definición empleada en las campañas paramétricas,

$$\Delta \% = 100 \frac{\text{RMSE}_{\text{sin PINN}} - \text{RMSE}_{\text{con PINN}}}{\text{RMSE}_{\text{sin PINN}}}. \quad (5.45)$$

Los mapas muestran el porcentaje original en cada celda. La clase se asigna con el umbral de $\pm 5\%$ y el piso de sensibilidad de 0.5 A o 0.5 V. Las condiciones de filtro liviano y pesado se conservan rayadas como ensayos de esfuerzo, pero no ingresan en los recuentos.

Las Figuras B.9(a), B.9(b), B.9(c) y B.9(d) del Apéndice B desglosan el RMSE nominal por tramo, escenario y modo. Permiten comprobar la distribución del error a lo largo de la escalera.

Cada celda compara **los dos configuraciones de control** en esa misma condición y ese mismo nivel de consigna. El color no distingue con PINN de sin PINN, sino cuánto cambia el error al activarla.

	rescate,	la PINN reduce el error de régimen más de un 5 %
	neutro,	la diferencia no llega al 5 %, o no alcanza el piso de sensibilidad
	daño,	la PINN aumenta el error de régimen más de un 5 %
	fuera de dominio,	la condición no está validada, y la celda no entra en los recuentos

Figura 5.45. *Clave de lectura de los mapas de mejora.*

La Figura 5.45 distingue rescate, neutralidad y daño. Una celda puede mostrar un porcentaje superior al 5 % y permanecer neutra si la diferencia absoluta no alcanza el piso. El color representa la clase final y el número conserva la magnitud relativa para no ocultar el resultado.

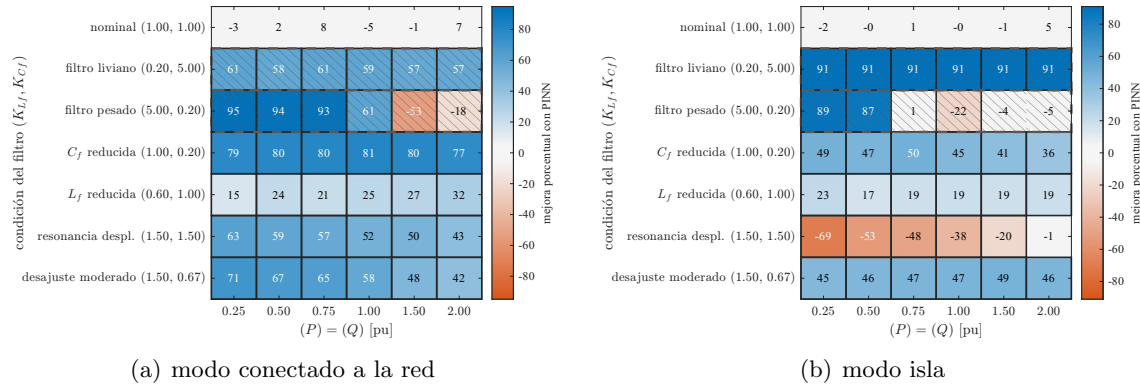


Figura 5.46. Escenario 1, mapa de mejora sobre el barrido de consignas.

La Figura 5.46(a) presenta el resultado más uniforme. La condición nominal permanece neutra y no aparece ningún daño dentro de la envolvente física. La capacitancia reducida conserva mejoras entre 77 y 81 %. La inductancia reducida mejora entre 15 y 32 %, mientras la resonancia desplazada y el desajuste moderado mantienen un aporte favorable que disminuye al aumentar el despacho. La estructura dominante sigue las filas del mapa y no una columna particular.

En la Figura 5.46(b), la capacitancia reducida mantiene mejoras entre 36 y 50 %, la inductancia reducida entre 17 y 23 % y el desajuste moderado alrededor del 45 al 49 %. Los cinco daños se concentran en la resonancia desplazada entre 0.25 y 1.50 pu. En 2 pu esa celda pasa a neutralidad. El modo isla conserva por tanto un aporte favorable en tres de las cuatro condiciones perturbadas, con una excepción localizada.

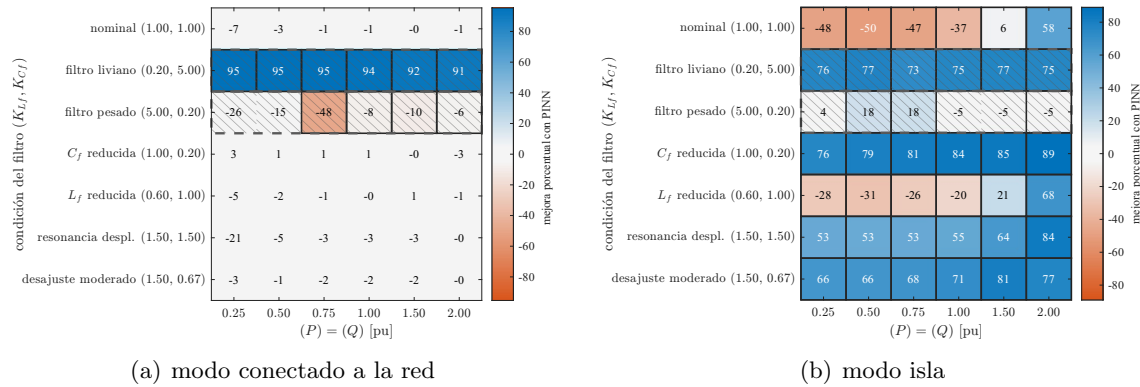


Figura 5.47. Escenario 2, mapa de mejora sobre el barrido de consignas.

La Figura 5.47(a) queda dominada por la neutralidad. Las treinta celdas incluidas no superan simultáneamente el umbral relativo y el piso absoluto. El integrador de la corriente de salida ya mantiene el error de régimen en valores bajos, por lo que la PINN dispone de poco margen para modificarlo. Los porcentajes escritos, incluido el -21% de la resonancia desplazada en 0.25 pu, deben leerse junto con el piso. Su diferencia absoluta sigue siendo menor que 0.5 A.

La Figura 5.47(b) presenta el mayor contraste. La capacitancia reducida, la resonancia

desplazada y el desajuste moderado mejoran en los seis niveles, con valores entre 53 y 89 %. La inductancia reducida produce daño hasta 1 pu y rescate en 1.50 y 2 pu. La fila nominal sigue el mismo cambio, con cuatro daños por debajo o en la unidad, una celda neutra en 1.50 pu y un rescate en 2 pu. El resultado muestra que el signo del aporte depende tanto del desajuste como del régimen del lazo formador.

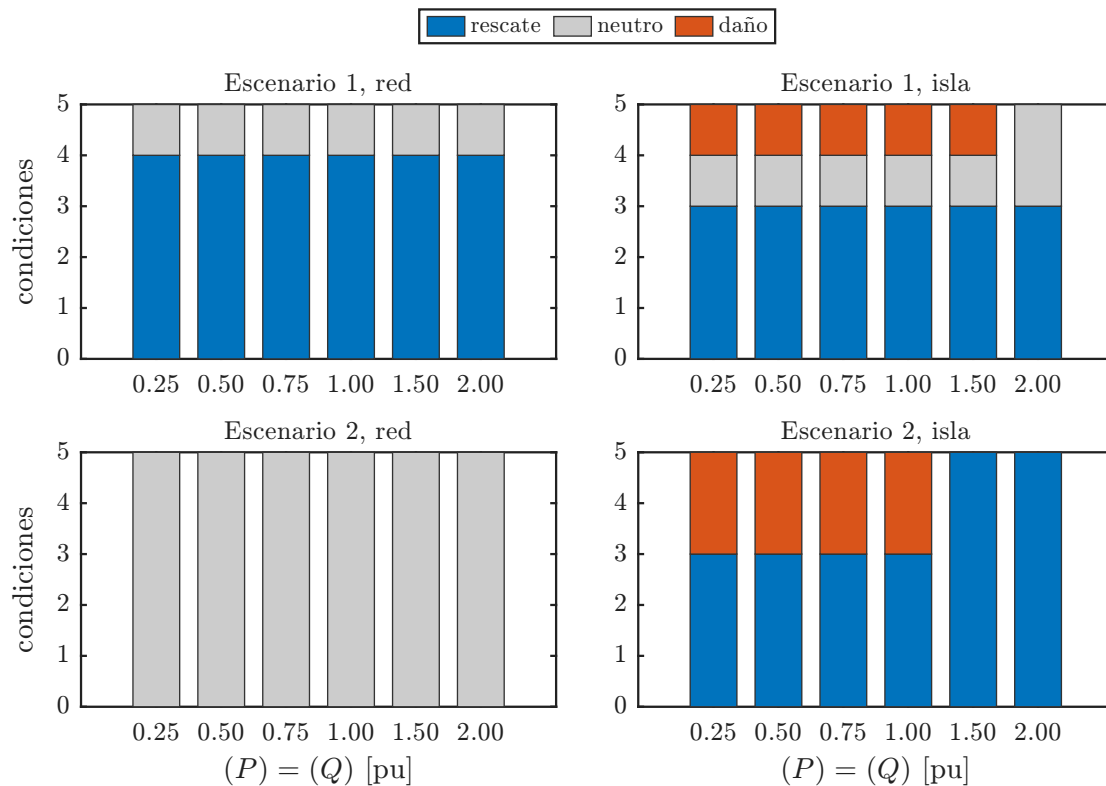


Figura 5.48. Clases de desempeño según el nivel de consigna.

La Figura 5.48 resume las cinco condiciones incluidas. En el Escenario 1 conectado a la red aparecen cuatro rescates y una neutralidad en cada nivel. En isla se obtienen tres rescates, una neutralidad y un daño hasta 1.50 pu. En 2 pu el daño pasa a neutralidad. El Escenario 2 en red conserva cinco neutralidades en las seis columnas. En isla aparecen tres rescates y dos daños hasta 1 pu, y cinco rescates en los dos niveles superiores.

Tabla 5.24
MEJORA MEDIANA SEGÚN EL NIVEL DE CONSIGNA.

Escenario	Modo	0.25	0.50	0.75	1.00	1.50	2.00
1	red	62.5	58.8	56.9	51.8	47.9	42.2
1	isla	23.3	17.0	19.1	19.3	18.9	19.3
2	red	-4.8	-1.8	-1.4	-0.9	-0.4	-0.8
2	isla	53.1	52.6	53.0	54.8	64.3	76.8

La Tabla 5.24 muestra que el nivel de consigna modifica la magnitud, pero no reorganiza por completo el comportamiento. El Escenario 1 conserva medianas positivas en ambos modos. El Escenario 2 permanece próximo a cero en red y aumenta su aporte en isla

hacia los niveles superiores. Esta lectura coincide con la distribución de clases de la figura anterior.

Tabla 5.25
RESUMEN DE LA CORRECCIÓN DENTRO DE LA ENVOLVENTE FÍSICA.

Escenario	Modo	Mediana $\Delta\%$	Celdas	Rescate	Neutralidad	Daño
1	red	48.8 %	30	24	6	0
1	isla	19.2 %	30	18	7	5
2	red	-1.4 %	30	0	30	0
2	isla	61.2 %	30	22	0	8

Los recuentos de la Tabla 5.25 incluyen el piso de sensibilidad. Sin ese piso, dos porcentajes pequeños en magnitud absoluta cambiarían de clase y el resumen dejaría de ser comparable con las Secciones 5.5 y 5.6. La mediana se calcula sobre los porcentajes originales, mientras las clases utilizan ambos criterios.

5.8.6. Cierre del sistema frente al desajuste

El último ensayo fija la consigna unitaria y recorre cuatro desajustes axiales del Escenario 2. Su objetivo es comprobar si la corrección sigue siendo útil cuando los lazos externos ya están activos.

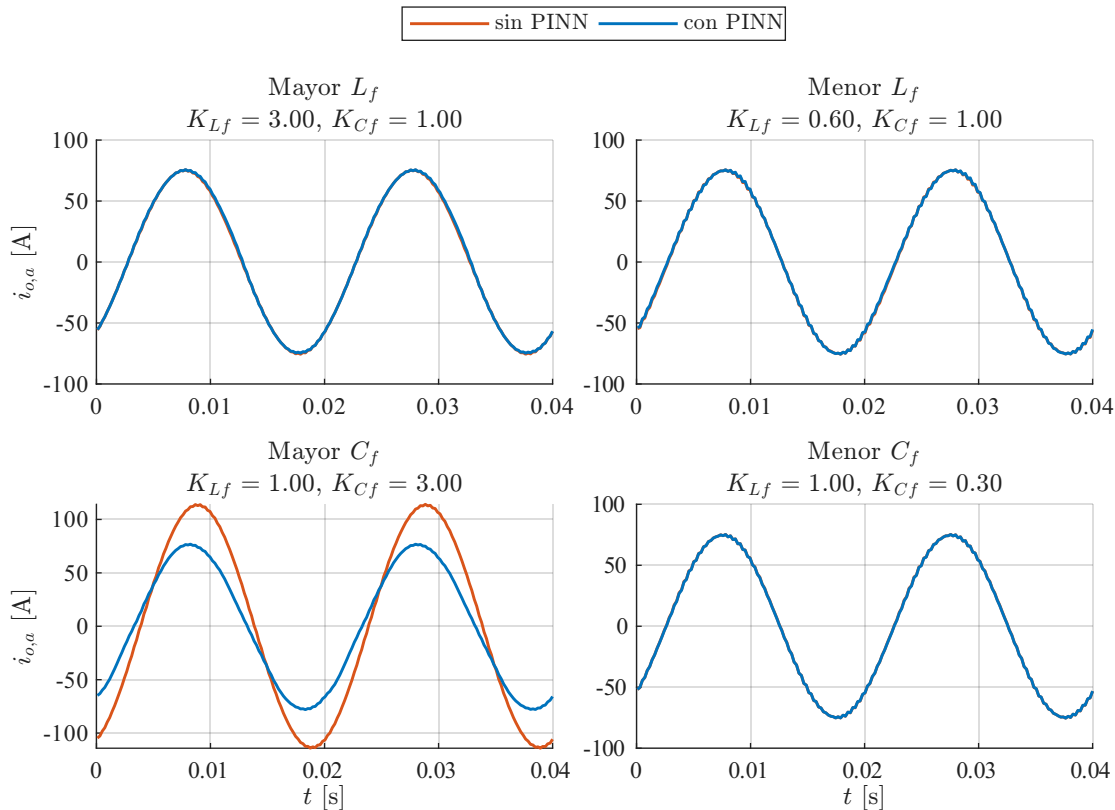


Figura 5.49. Corriente del maestro en cuatro condiciones de desajuste.

La Figura 5.49 muestra superposición en tres condiciones y una separación clara al aumentar C_f . La comparación se cuantifica en la Tabla 5.26.

Tabla 5.26
RMSE DE CORRIENTE EN EL CIERRE DEL SISTEMA.

Condición	K_{Lf}	K_{Cf}	Sin PINN [A]	Con PINN [A]	$\Delta\%$
Inductancia aumentada	3.00	1.00	3.61	3.41	+5.5
Inductancia reducida	0.60	1.00	3.72	3.92	-5.4
Capacitancia aumentada	1.00	3.00	27.04	3.75	+86.1
Capacitancia reducida	1.00	0.30	3.68	3.66	+0.5

En las dos variaciones inductivas y en la capacitancia reducida, el RMSE permanece entre 3.41 A y 3.92 A. El controlador base ya conserva un seguimiento acotado y la corrección cambia poco el resultado. Al triplicar C_f , el RMSE disminuye de 27.04 A a 3.75 A, una mejora del 86.1 %. En este caso el lazo convencional relevante es el integrador de la corriente de salida del esquema modulado. Por sí solo absorbe las dos variaciones de L_f y la reducción de C_f , pero deja de ser suficiente cuando la capacitancia se triplica. La PINN complementa entonces al integrador y recupera el seguimiento. Cuando el error base ya es pequeño, esa acción adicional no garantiza una ventaja apreciable.

5.8.7. Síntesis y alcance

El ensayo confirma el reparto de potencia en los seis niveles y los tres regímenes de intercambio con la red. Las consignas efectiva y solicitada coinciden, de modo que la saturación no explica las diferencias de seguimiento. El sistema separa los canales activo y reactivo con un acoplamiento residual pequeño frente al recorrido impuesto.

La corrección conserva el aporte observado en las campañas paramétricas, pero su utilidad depende del escenario, el modo y la condición del filtro. El Escenario 1 presenta un beneficio amplio en red y más acotado en isla. El Escenario 2 es neutro en red y favorable en isla para tres de las cuatro condiciones perturbadas. El cierre con capacitancia aumentada demuestra que la mejora puede mantenerse con el sistema completo y los lazos externos activos.

La principal limitación corresponde a ρ_{Lf} en el esquema modulado. La nueva formulación del predictor y la lbPINN mejoran la coherencia del modelo y del entrenamiento, pero no eliminan la sensibilidad al despacho. Este resultado debe conservarse como una restricción de alcance y motiva comprobar la invariancia frente al punto de operación antes de transferir el identificador a otra carga o a otro rango de consignas.

5.9. Ensayo de retirada del término físico de la pérdida

Se compara el lbPINN del Escenario 2 con el mismo regresor entrenado sin pérdida física para determinar su aporte a la identificación y al seguimiento. Se separan el ajuste de etiquetas, la consistencia física y el RMSE en lazo cerrado. Las nuevas repeticiones complementan las campañas originales sin sustituir sus redes.

5.9.1. Diseño y repetición emparejada

Cada modo conserva 550 escenarios de ajuste y 50 de validación (1 922 250 y 174 750 muestras). Se emparejan las semillas 0–4 y sus matrices iniciales. Con dos capas de 32 neuronas, tres salidas y 26 entradas en red o 28 en isla, el regresor tiene 2019 o 2083 parámetros. Las veinte redes completan 5000 épocas de lote completo, tasa 10^{-3} y regularización 10^{-5} , bajo el mismo criterio de parada.

El peso de la pérdida de datos continúa siendo aprendible en ambas variantes. Los pesos se ajustan durante el entrenamiento, no durante la simulación de control. Aprenderlos no elimina la dependencia de la inicialización, por lo que se evalúan cinco semillas tanto con física como sin ella. Con $\lambda_j = \frac{1}{2}e^{-s_j}$, las pérdidas son

$$\mathcal{L}_{\text{completa}} = \lambda_d \mathcal{L}_d + \lambda_p \mathcal{L}_p + \frac{1}{2}(s_d + s_p) + 10^{-5} \mathcal{L}_{\text{reg}}, \quad (5.46)$$

$$\mathcal{L}_{\text{sin}} = \lambda_d \mathcal{L}_d + \frac{1}{2}s_d + 10^{-5} \mathcal{L}_{\text{reg}}. \quad (5.47)$$

Se elimina también $s_p/2$ y se fija $s_p = 0$, pues conservarlo sin pérdida asociada dejaría el objetivo no acotado. Se conserva $s_d/2$, que impide la solución trivial en que s_d crece sin límite y anula el peso de los datos (Subsección 4.6.6). No cambia el regresor, y solo pasan de dos a uno los escalares activos de ponderación, con tasa 2×10^{-5} y recorte $[-10, 10]$. La regularización sigue fija.

La validación mide la predicción de las etiquetas en las 174 750 muestras reservadas por modo, sin utilizarlas para actualizar los pesos. Se calcula

$$\text{MSE}_{\text{val}} = \frac{1}{3N_{\text{val}}} \sum_{n=1}^{N_{\text{val}}} \|\tilde{\eta}_n - \tilde{\eta}_{\text{true},n}\|_2^2.$$

Es un promedio adimensional sobre las tres salidas normalizadas, sin ponderación física ni regularización. No es el RMSE de tensión o corriente, ni una fracción de la pérdida total. Se selecciona el menor MSE de validación antes de probar el control, con mejora mínima 10^{-5} y paciencia de 150 épocas. MATLAB reproduce las veinte validaciones GPU con diferencia máxima 2.8×10^{-9} , tras verificar predicción, gradientes y Adam. Se reportan todas las semillas.

Tabla 5.27

VALIDACIÓN Y RESIDUO FÍSICO RETENIDO. MEDIA Y DESVIACIÓN ESTÁNDAR ENTRE CINCO SEMILLAS.

Modo	Variante	MSE de validación	$\mathcal{L}_p$ en validación
red	completa	0.01764 ± 0.00231	0.01713 ± 0.00019
red	sin física	0.01536 ± 0.00194	0.02898 ± 0.00092
isla	completa	0.02106 ± 0.00062	0.07335 ± 0.00034
isla	sin física	0.01278 ± 0.00074	0.10801 ± 0.00091

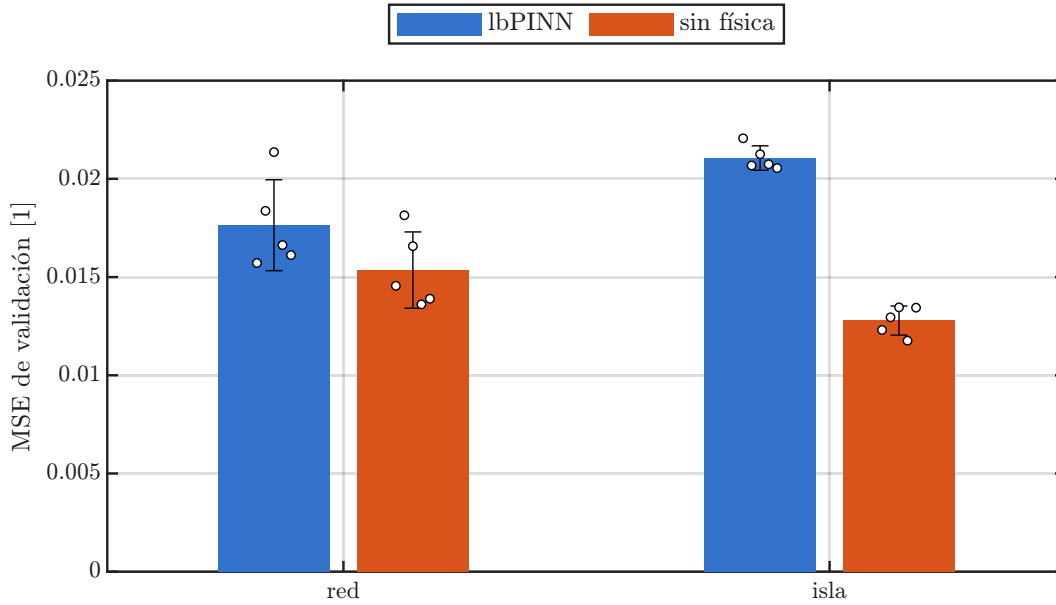


Figura 5.50. Validación de las cinco parejas por modo.

La Figura 5.50 muestra semillas y desviaciones estándar muestrales. Sin física, el MSE baja en las cinco parejas de cada modo. La diferencia media es -0.00228 en red, con IC del 95 % $[-0.00446, -0.00010]$, y -0.00828 en isla, con IC $[-0.00961, -0.00694]$. Se calculan intervalos t sobre cinco diferencias emparejadas, no sobre muestras temporales.

5.9.2. Identificación y consistencia física

La Tabla 5.28 resume entre semillas la mediana y el percentil 90 de $100|\ln(\rho/K)|$, y el sesgo mediano ρ/K , sobre las 50 condiciones retenidas por modo. No usa $100|\rho/K - 1|$ ni las 491 condiciones de la campaña histórica.

Tabla 5.28
IDENTIFICACIÓN RETENIDA POR SEMILLA. LAS DOS COLUMNAS DE ERROR ESTÁN EXPRESADAS EN PORCENTAJE LOGARÍTMICO.

Modo	Variante	Factor	Mediana	Percentil 90	Sesgo ρ/K
red	completa	L_f	6.90 ± 0.49	20.77 ± 1.97	1.003 ± 0.004
red	completa	C_f	9.85 ± 1.59	39.98 ± 3.63	1.006 ± 0.005
red	sin física	L_f	6.55 ± 1.00	19.87 ± 2.77	1.000 ± 0.004
red	sin física	C_f	9.36 ± 0.50	36.68 ± 2.74	0.996 ± 0.001
isla	completa	L_f	7.98 ± 0.54	22.92 ± 1.06	0.994 ± 0.006
isla	completa	C_f	11.90 ± 0.24	46.77 ± 1.04	1.028 ± 0.009
isla	sin física	L_f	6.98 ± 0.55	20.67 ± 1.33	1.006 ± 0.004
isla	sin física	C_f	9.50 ± 0.47	31.69 ± 1.07	0.993 ± 0.003

Sin física, ambas medianas de identificación bajan en las cinco parejas de isla, mientras en red, sus intervalos incluyen cero. El menor MSE no implica mejora uniforme por

parámetro. Con lbPINN, el residuo físico es menor en las diez parejas, y aumenta la consistencia del balance discreto, en competencia con el ajuste de etiquetas.

Los IC del 95 % de la diferencia de medianas sin física menos completa, en puntos porcentuales logarítmicos, son red: L_f $[-1.28, 0.59]$, C_f $[-2.14, 1.15]$, e isla: L_f $[-1.86, -0.16]$, C_f $[-2.87, -1.92]$.

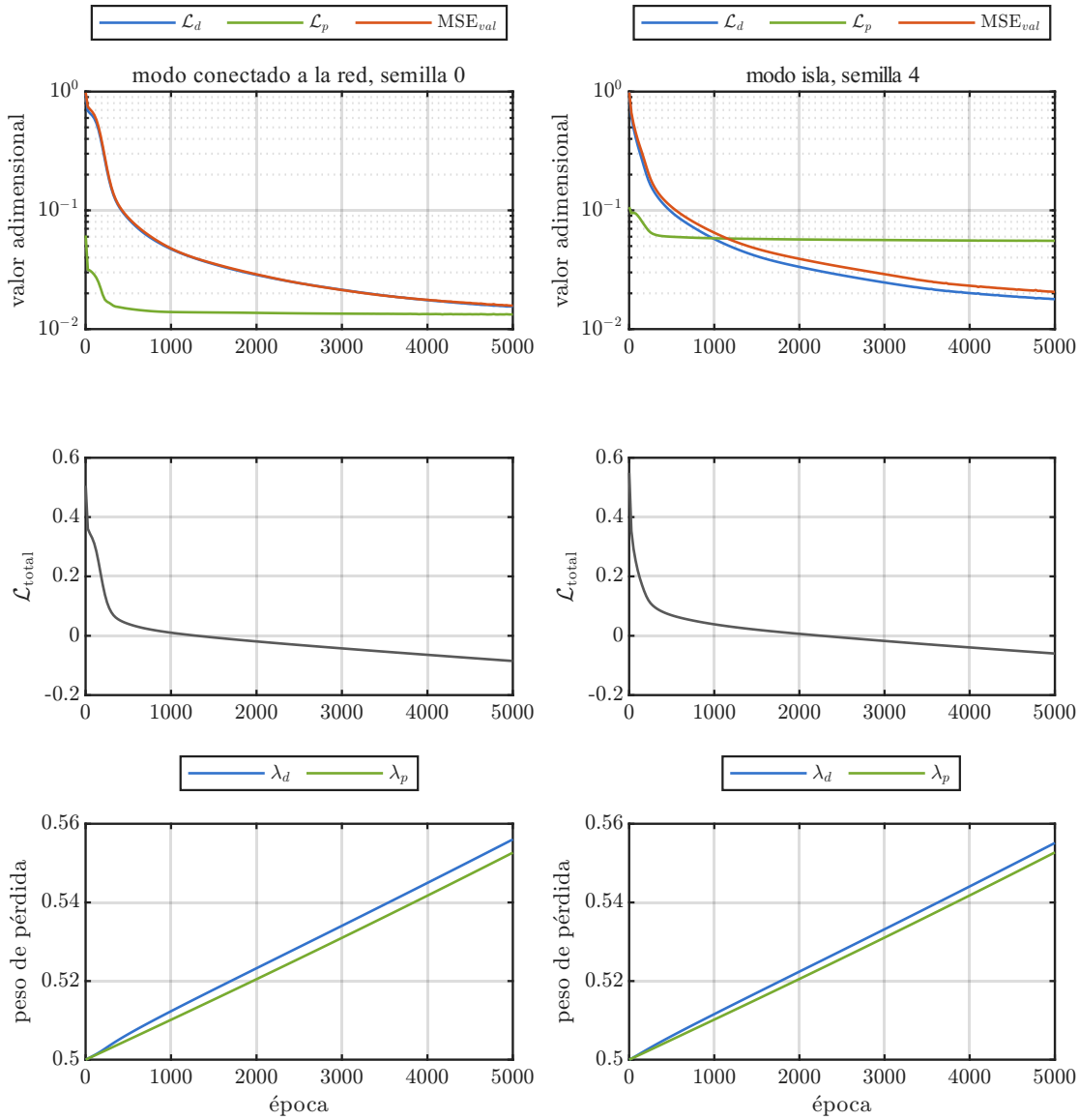


Figura 5.51. Pérdidas y pesos adaptativos del lbPINN seleccionado por validación en cada modo. Cada columna corresponde a un modo distinto.

La Figura 5.51 corresponde al lbPINN seleccionado por validación en cada modo. La primera fila muestra la pérdida de datos $\mathcal{L}_d$, el residuo físico $\mathcal{L}_p$ sin ponderar y el MSE de validación. La segunda muestra el costo total y la tercera los pesos λ_d y λ_p , que no son porcentajes ni tienen que sumar uno. El total puede ser negativo por $(s_d + s_p)/2$ y usa escala lineal, mientras la primera fila usa escala logarítmica. Datos, física y total se

registran antes de la actualización de cada época, y validación y pesos después.

Con tasa 2×10^{-5} , s_d y s_p avanzan al ritmo máximo del optimizador y en 5000 épocas solo llegan a -0.11 y -0.10 . En las diez redes completas los pesos pasan de 0.500 a 0.556 y 0.553 , con λ_p/λ_d entre 0.99 y 1.00 , de modo que en este presupuesto la ponderación opera como un reparto prácticamente igual entre datos y física. El residuo compite así de forma directa con los datos. Al final del entrenamiento, en isla $\mathcal{L}_p$ triplica a $\mathcal{L}_d$, 0.055 frente a 0.018 , mientras en red son comparables, 0.013 frente a valores de 0.015 a 0.021 . Esa diferencia es compatible con la mayor mejora de validación que obtiene la variante sin física en isla.

5.9.3. Comparación en lazo cerrado

Cada pareja se despliega en el mismo PLECS del Escenario 2, con iguales estados iniciales, consignas, muestreo y control. El ensayo inicial reúne 60 corridas: nominal, $K_{Lf} = 1.2$ y $K_{Cf} = 1.2$, dos variantes, cinco semillas y dos modos. Cada registro dura 1.6 s, y se evalúa RMSE trifásico de v_C en isla o i_o en red entre 1.4 y 1.6 s. Se conservan además sesgo y percentil 90 de factores aplicados, RMSE entre 0.6 y 0.8 s y corriente máxima posterior a 0.6 s. Los parámetros permanecen constantes.

Tabla 5.29

RMSE EN LAZO CERRADO Y DIFERENCIA EMPAREJADA. EL INTERVALO CORRESPONDE A SIN FÍSICA MENOS COMPLETA.

Modo	Condición	Completa	Sin física	IC 95 % de diferencia
red [A]	nominal	0.811 ± 0.052	0.815 ± 0.038	$[-0.084, 0.093]$
red [A]	$K_{Lf} = 1.2$	0.765 ± 0.084	0.757 ± 0.067	$[-0.122, 0.106]$
red [A]	$K_{Cf} = 1.2$	0.807 ± 0.080	0.798 ± 0.046	$[-0.123, 0.106]$
isla [V]	nominal	1.926 ± 0.447	1.701 ± 0.444	$[-1.173, 0.723]$
isla [V]	$K_{Lf} = 1.2$	1.776 ± 0.243	1.546 ± 0.416	$[-1.023, 0.563]$
isla [V]	$K_{Cf} = 1.2$	2.538 ± 0.776	2.412 ± 0.471	$[-1.451, 1.199]$

Sin física, el RMSE baja en 19 de las 30 parejas iniciales (Tabla 5.29). Esta métrica de seguimiento es distinta del MSE retenido, y las pruebas moderadas no redefinen las fronteras de divergencia.

Los seis IC iniciales de RMSE incluyen cero, por lo que no establecen superioridad de seguimiento. Sí se observa menor MSE retenido sin física y menor residuo físico con ella.

Las Figuras 5.52 y 5.53 completan $K = 0.8$ con cuarenta corridas adicionales bajo el mismo protocolo, con cien simulaciones en total. Se varía un factor y se mantiene el otro en uno. Cada punto representa cinco semillas, y las barras indican desviación estándar y las líneas solo unen los tres niveles ensayados. El nominal se comparte entre paneles, sin duplicarlo en el recuento.

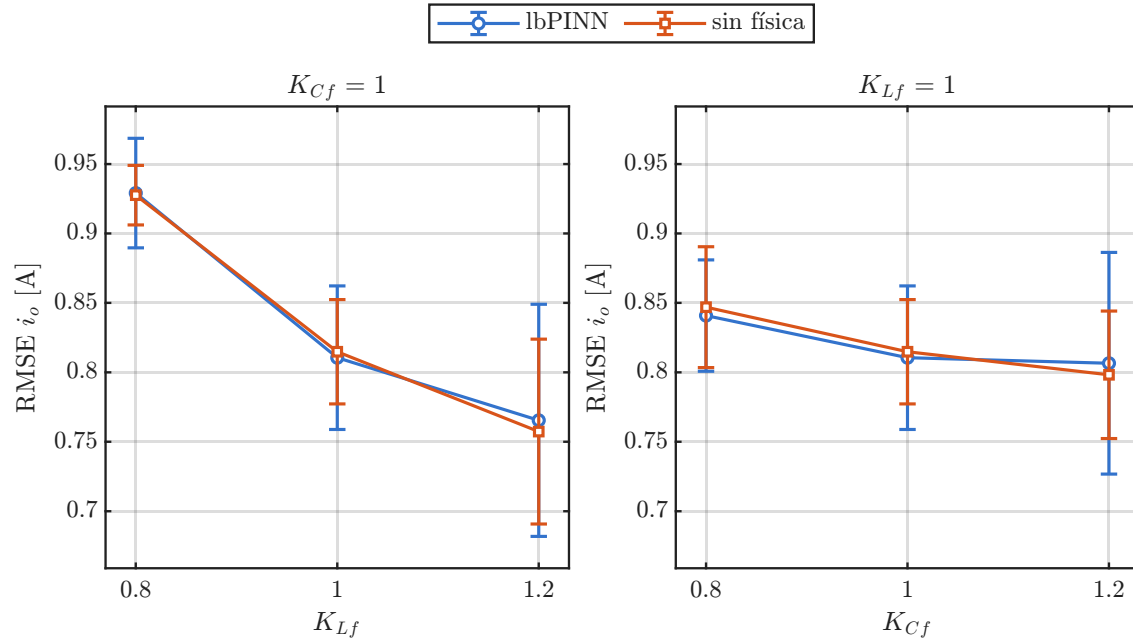


Figura 5.52. RMSE frente a los factores del filtro, Escenario 2 conectado a la red.

En red, ambas variantes presentan respuestas próximas. Para $K_{Lf} = 0.8$, los RMSE medios son 0.9291 A con lbPINN y 0.9276 A sin física, y para $K_{Cf} = 0.8$, 0.8409 y 0.8469 A. Retirar la física no mejora uniformemente el seguimiento.

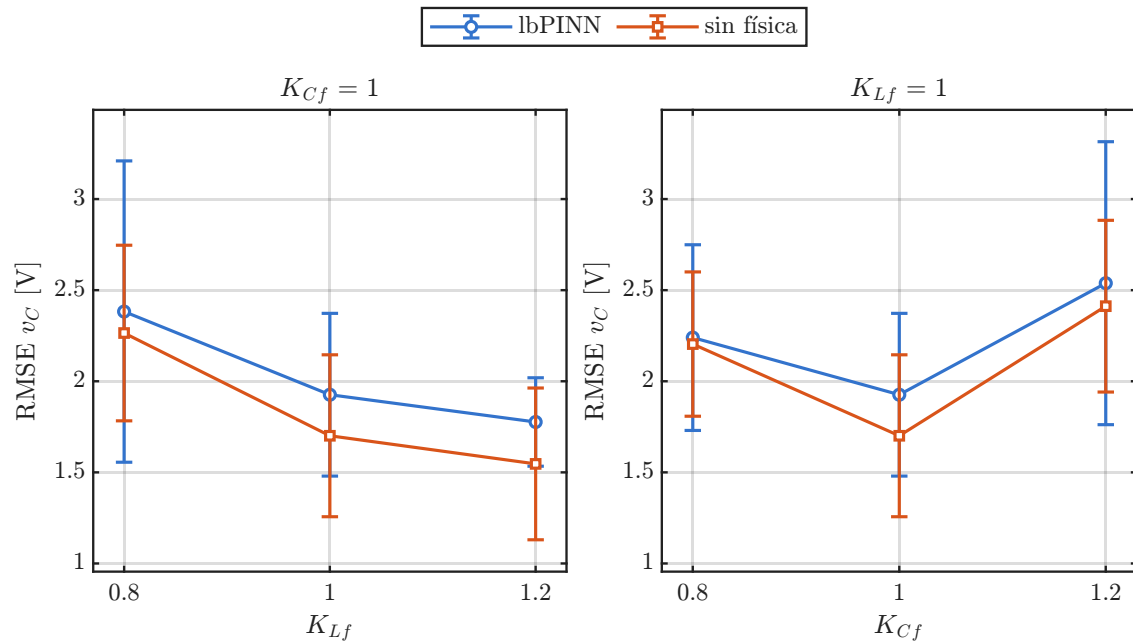


Figura 5.53. RMSE frente a los factores del filtro, Escenario 2 en isla.

En isla, las medias sin física son menores, pero la dispersión impide afirmar superioridad. En $K_{Lf} = 0.8$ se obtienen 2.3823 frente a 2.2645 V, y en $K_{Cf} = 0.8$, 2.2395 frente

a 2.2039 V. Los diez IC emparejados de la campaña ampliada incluyen cero, y sin física reduce el RMSE en 29 de 50 parejas. Estos niveles moderados no permiten deducir límites de divergencia.

5.9.4. Interpretación del ensayo

El conjunto de ajuste es denso, con 550 escenarios y 1 922 250 muestras por modo, y sus etiquetas son exactas por construcción. En ese régimen el término de datos basta para identificar y el residuo físico añade una restricción de consistencia que compite con él. La tensión aplicada y la corriente de salida medidas ya incorporan la interacción con la planta. Se espera que la física aporte más con datos escasos o fuera del rango de K entrenado, condición que este ensayo no cubre.

Las doce redes estáticas previas quedan como antecedente en el Apéndice A.11. Compararlas con el modelo adaptativo cambia tanto la física como la ponderación. Las parejas nuevas conservan adaptativa la pérdida de datos y aíslan la retirada física.

En el dominio evaluado, retirar la física reduce el MSE de validación y mejora la identificación de ambos parámetros en isla. Mantenerla reduce el residuo físico, pero las diferencias emparejadas de RMSE no demuestran una ventaja general de control. Las dos subsecciones siguientes atienden por separado el seguimiento de parámetros variables y la decisión de aplicar la corrección, con el lbPINN desplegado y sin comparar variantes de pérdida.

5.9.5. Seguimiento de parámetros efectivos

Este ensayo evalúa si el lbPINN desplegado del Escenario 2 sigue un parámetro variable, no el efecto de retirar la física. Se aplican escalones y rampas independientes de L_f y C_f , del nominal a $K = 0.8$ o 1.2 , con 16 corridas en ambos modos. El cambio comienza a 0.6 s y la rampa dura 0.4 s, con rangos de 2.4–3.6 mH y 400–600 μF .

El banco varía los coeficientes $v_L = L_f(t) di_f/dt$ e $i_C = C_f(t) dv_C/dt$ con estados continuos. Representa parámetros efectivos, no la ley completa de saturación ni el intercambio energético de variar físicamente un componente. Con factores constantes reproduce el circuito nominal con diferencias inferiores a 2×10^{-10} .

Se registra el factor verdadero K , la salida instantánea $\rho = e^\eta$ y el factor aplicado, filtrado a 2 ms con $\alpha = \tau/(\tau + T_s)$ y después saturado en $[0.05, 5]$. En la Tabla 5.30, t_{50} es el tiempo desde el escalón hasta cruzar la mitad del cambio entre las medias previa y final de la estimación, manteniendo el cruce durante 2 ms. No mide llegada al valor verdadero. El error final es $100(\bar{\rho}_{\text{final}}/K - 1)$ y conserva el signo. El sobrepaso mide cuánto supera el factor filtrado a K , en el sentido del cambio, como porcentaje del escalón impuesto.

Tabla 5.30

SEGUIMIENTO DE ESCALONES CON LBPINN, RESPUESTA DEL FACTOR FILTRADO.

Modo	Factor	K	t_{50} [ms]	Error [%]	Sobrepaso [%]	RMSE	$ i_f _{\text{máx}}$ [A]
red	L_f	0.8	2.15	1.78	13.8	0.995	54.71
red	L_f	1.2	1.50	-7.30	0.0	0.799	55.54
red	C_f	0.8	2.15	3.13	0.0	1.021	57.60
red	C_f	1.2	1.29	0.03	21.2	0.968	54.75
isla	L_f	0.8	2.36	21.56	0.0	2.367	60.19
isla	L_f	1.2	6.22	-5.28	3.7	1.701	60.72
isla	C_f	0.8	1.72	0.53	34.9	2.504	62.14
isla	C_f	1.2	3.43	5.78	62.4	2.501	59.85

El RMSE usa $[0.6, 0.8)$ s, en amperios en red y voltios en isla, y la corriente es el máximo trifásico posterior al cambio. Las medias finales usan $[1.4, 1.6)$ s. Al reducir L_f en isla, el factor termina un 21.6 % por encima del verdadero, de modo que responder pronto no implica identificar con exactitud.

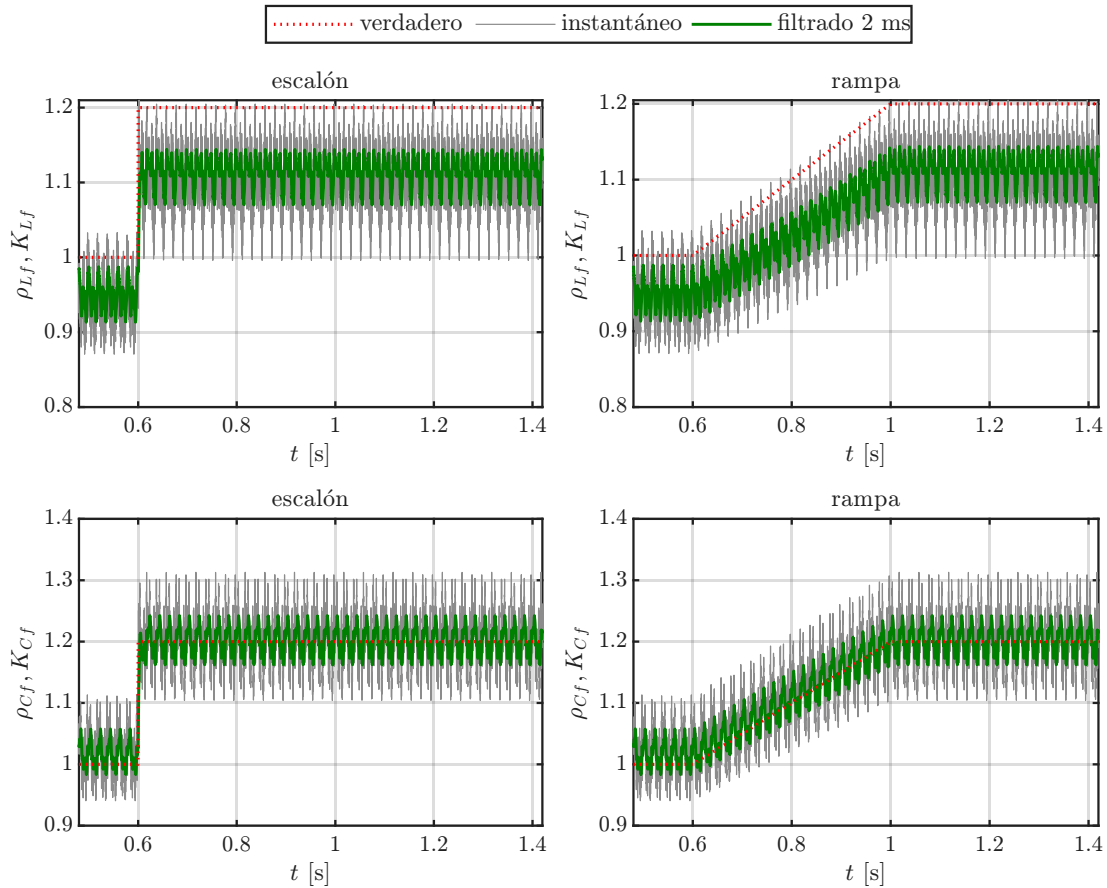


Figura 5.54. Escalones y rampas de incremento del 20 % en red.

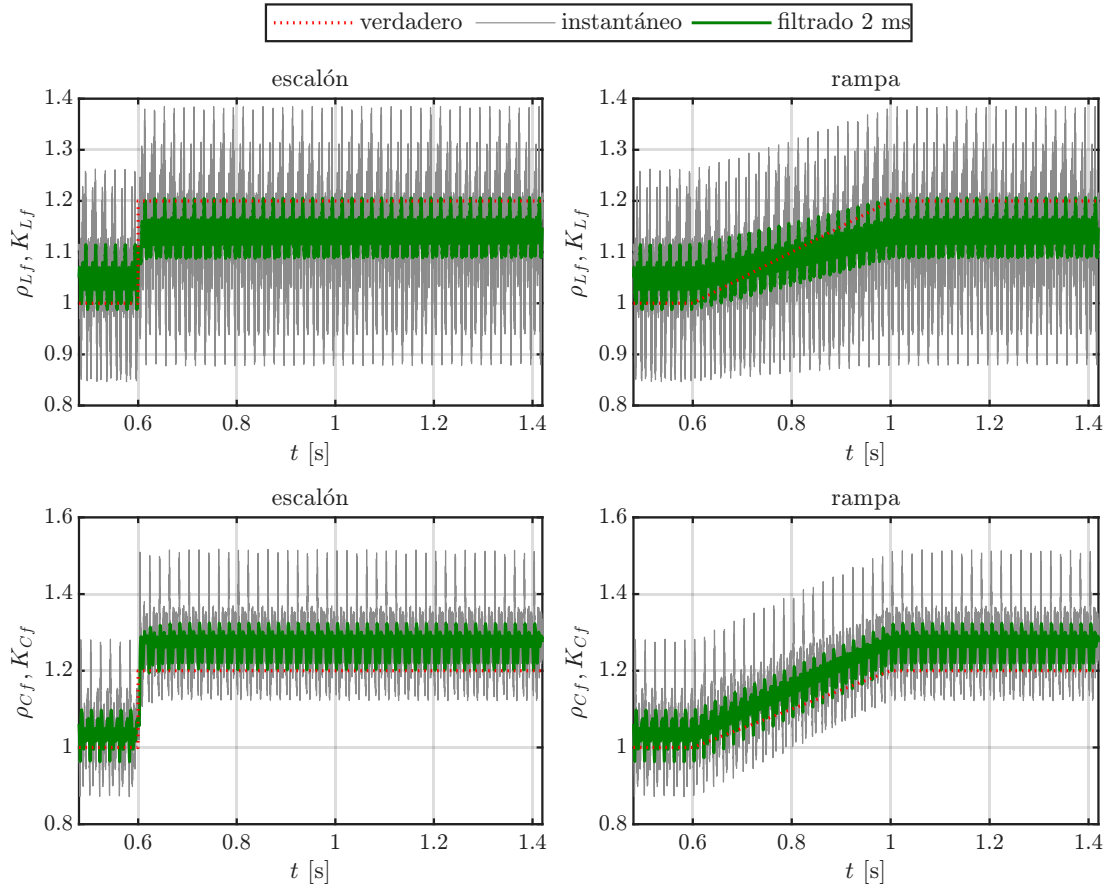


Figura 5.55. Escalones y rampas de incremento del 20 % en isla.

El desplazamiento de las rampas combina retardo, sesgo y ganancia. Los registros incluyen las disminuciones del 20 %, su error y el establecimiento durante 20 ms en una banda del 10 % del cambio impuesto, y se indica “no alcanzado” cuando no se cumple.

5.9.6. Habilitación condicionada de la corrección

Este ensayo decide cuándo aplicar los factores del lbPINN desplegado, sin cambiar su entrenamiento. La red neuronal se ejecuta en las tres políticas y siempre entrega sus factores, lo que cambia es si el predictor los usa.

- *Corrección apagada.* El predictor emplea los parámetros nominales del filtro, es decir $\rho_{Lf} = \rho_{Cf} = 1$. Es la referencia sin corrección.
- *Corrección permanente.* El predictor emplea siempre los factores estimados y filtrados, sin importar cuánto se aparten del nominal. Es la política de las campañas de los Capítulos anteriores.
- *Corrección condicionada.* El predictor emplea los factores solo mientras la regla de habilitación detecta un desajuste persistente, y vuelve a los parámetros nominales cuando la firma estimada regresa a su banda.

Se comparan el nominal y cambios independientes de -10 , $+10$ y $+20$ % de L_f y C_f , con 42 respuestas en ambos modos. La primera regla, basada en innovación absoluta, no activó en ninguna de las catorce condiciones. Se sustituyó por banda muerta con catorce corridas nuevas, reutilizando las referencias apagada y permanente.

$$\ell_j(k) = \text{LPF}_{20\text{ms}}\{\ln \rho_j(k)\}, \quad D_k = \max_{j \in \{L_f, C_f\}} \frac{|\ell_j(k) - \bar{\ell}_{j,\text{nom}}|}{b_j}. \quad (5.48)$$

Se calibra solo con el nominal apagado, entre 0.4 y 1.4 s: $b_j = \max\{\ln(1.05), 1.2 p_{99}(|\ell_j - \bar{\ell}_{j,\text{nom}}|)\} = \ln(1.05)$ en ambos modos. Las medias $(\bar{\ell}_{L_f}, \bar{\ell}_{C_f})$ son $(-0.05341, 0.01575)$ en red y $(0.04259, 0.03886)$ en isla. Se fijan antes de las nuevas pruebas, sin usar factores verdaderos.

Desde 0.4 s se habilita con $D_k \geq 1$ durante 20 ms y se deshabilita con $D_k \leq 0.5$ durante 100 ms. La transición hacia el factor estimado o uno añade un suavizado de 2 ms, ausente en el modo permanente. La banda se centra en la firma nominal, no en la unidad, y los cambios de modo o valores no finitos reinician la habilitación.

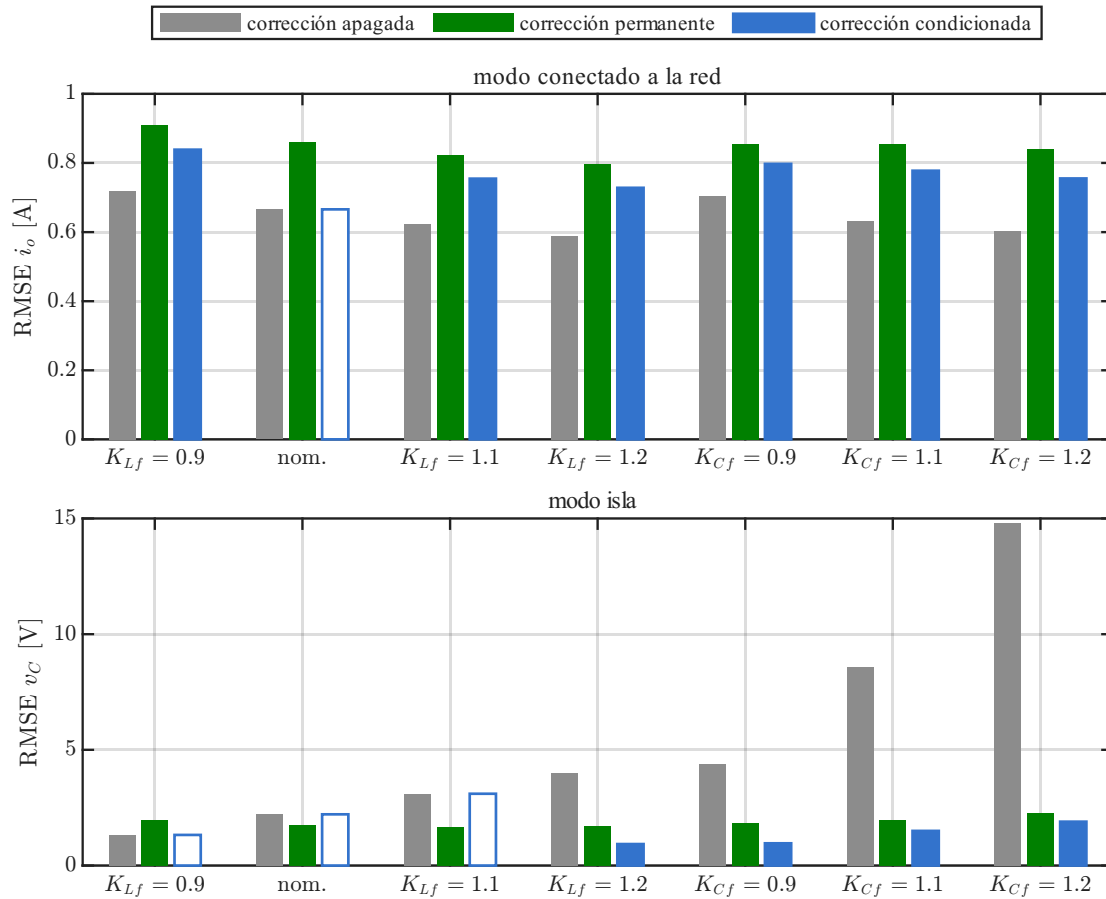


Figura 5.56. RMSE con tres políticas de aplicación de los factores del lbPINN. Cada grupo es una corrida independiente y las barras condicionadas sin relleno indican que la regla no se activó.

Tabla 5.31

RMSE FINAL, FRACCIÓN HABILITADA EN RÉGIMEN Y CAMBIOS DE HABILITACIÓN POSTERIORES A 0.4 s.

Modo	Condición	Apagada	Permanente	Condicionada	Activa [%]	Cambios
red [A]	$K_{Lf}=0.9$	0.719	0.911	0.839	100.0	1
red [A]	nominal	0.666	0.860	0.666	0.0	0
red [A]	$K_{Lf}=1.1$	0.623	0.823	0.755	100.0	1
red [A]	$K_{Lf}=1.2$	0.588	0.797	0.728	100.0	1
red [A]	$K_{Cf}=0.9$	0.704	0.856	0.797	100.0	1
red [A]	$K_{Cf}=1.1$	0.632	0.856	0.778	100.0	1
red [A]	$K_{Cf}=1.2$	0.603	0.840	0.755	100.0	1
isla [V]	$K_{Lf}=0.9$	1.323	1.979	1.323	0.0	0
isla [V]	nominal	2.214	1.763	2.214	0.0	0
isla [V]	$K_{Lf}=1.1$	3.103	1.678	3.103	0.0	0
isla [V]	$K_{Lf}=1.2$	3.985	1.695	0.929	100.0	1
isla [V]	$K_{Cf}=0.9$	4.374	1.858	0.961	100.0	1
isla [V]	$K_{Cf}=1.1$	8.589	1.953	1.498	100.0	1
isla [V]	$K_{Cf}=1.2$	14.803	2.249	1.896	100.0	1

La Figura 5.56 muestra RMSE de i_o en red y de v_C en isla. La regla se activa en 10 de las 14 condiciones y en las otras cuatro reproduce a la corrección apagada.

En red, la corrección permanente aumenta el RMSE en las siete condiciones, entre 22 y 39 % respecto de la apagada, incluido el nominal, de 0.666 a 0.860 A. La condicionada se activa en las seis perturbaciones y reduce ese aumento a 13–25 %, sin superar a la apagada. Ante desajustes de hasta 20 % el lazo de corriente absorbe el error de modelo y aplicar la corrección no mejora el seguimiento.

En isla, la corrección permanente reduce el RMSE en seis de siete condiciones y solo lo empeora con $K_{Lf} = 0.9$, de 1.323 a 1.979 V. La condicionada se activa con $K_{Lf} = 1.2$ y con los tres cambios de C_f , y en ellos logra el menor RMSE de las tres políticas, con reducciones de 77 a 87 %. Con $K_{Lf} = 0.9$, en el nominal y con $K_{Lf} = 1.1$ no se activa. Evita así la degradación de 0.9, pero pierde la mejora de 20 y 46 % que la permanente obtiene en el nominal y en 1.1. Estos valores pertenecen al protocolo aquí declarado y no reemplazan los nominales históricos.

La regla no distingue cambios de 10 % en L_f en isla porque el factor estimado recorre aproximadamente entre un tercio y la mitad del cambio logarítmico impuesto, como muestra la Tabla 5.30, y ese recorrido queda dentro de la banda $\ln(1.05)$. Aplicar la corrección conviene según el modo y la precisión de cada factor, algo que una banda común no captura. La regla evaluada es un primer criterio y su mejora combina selección y suavizado adicional, sin demostrar optimalidad.

5.10. Escenario 3, identificación paramétrica distribuida en las tres unidades

Los escenarios anteriores aplican la corrección aprendida solo al convertidor maestro. Esta sección extiende la arquitectura a los dos esclavos para evaluar si tres identificadores pueden operar de forma simultánea y si la respuesta de cada red se concentra en el filtro al que pertenece. El maestro conserva la PINN del Escenario 2. Cada esclavo ejecuta

una instancia de la red ajustada para su filtro LCL. Como los dos esclavos tienen la misma estructura y los mismos parámetros nominales, emplean la misma arquitectura y los mismos pesos, aunque cada instancia recibe únicamente las mediciones de su propia unidad y la tensión común del PCC.

La evaluación separa tres preguntas. La primera es si cada red identifica su propio filtro. La segunda es cuánto cambia la estimación de una unidad sana cuando se perturba otro convertidor. La tercera es si la corrección reduce el error de la variable que gobierna cada unidad. Esta separación es necesaria porque una identificación precisa no implica por sí sola que todas las señales internas mejoren en lazo cerrado.

5.10.1. Diseño factorial y métrica

La comparación mantiene la misma realización de los estados con la corrección apagada y encendida. En particular, las dos variantes utilizan la tensión aplicada en el periodo anterior. La única diferencia entre cada par es el uso de los factores identificados en el predictor. En los esclavos la estimación se obtiene sobre una ventana sin compensación, se promedia y luego se mantiene fija. De este modo, la corrección no modifica la trayectoria sobre la que se calcula el factor que después utiliza.

El ensayo cruza cinco ubicaciones de perturbación, dos modos de operación y dos configuraciones de control. Las ubicaciones corresponden al caso nominal, solo el maestro, solo el esclavo 1, solo el esclavo 2 y las tres unidades. En cada filtro perturbado se fija $K_{Lf} = K_{Cf} = 1.5$. El cruce completo contiene veinte simulaciones de 1.2 s y la evaluación utiliza los últimos 0.1 s. La fila nominal mide el costo de activar la corrección cuando no existe una perturbación declarada.

Cada unidad conserva el RMSE dimensional de la ecuación (5.24). En modo conectado a la red se evalúa i_o en las tres unidades. En isla se evalúa v_C en el maestro, que forma la tensión, e i_f en los esclavos, que siguen corriente. Los resultados se expresan por tanto en voltios o amperios igual que en las Secciones 5.5 y 5.6. Solo para reunir las tres unidades en un indicador común se define

$$\varepsilon_j = \frac{\text{RMSE}_j}{Y_{b,j}}, \quad \varepsilon_\Sigma = \sqrt{\frac{\varepsilon_M^2 + \varepsilon_{S1}^2 + \varepsilon_{S2}^2}{3}}. \quad (5.49)$$

Las bases no se obtienen de los resultados ni se ajustan para esta sección. Proceden del sistema por unidad definido en el Capítulo 4,

$$V_b = \frac{220}{\sqrt{2}} = 155.56 \text{ V}, \quad I_{b,\text{carga}} = \frac{V_b}{\sqrt{R_{\text{carga}}^2 + (\omega L_{\text{carga}})^2}} = 106.45 \text{ A}, \quad (5.50)$$

de donde $I_{b,M} = 0.5I_{b,\text{carga}} = 53.23 \text{ A}$ e $I_{b,S} = 0.25I_{b,\text{carga}} = 26.61 \text{ A}$. En isla se usa $Y_{b,M} = V_b$ y $Y_{b,S1} = Y_{b,S2} = I_{b,S}$. En conexión a red se usa $Y_{b,M} = I_{b,M}$ para el maestro y $I_{b,S}$ para cada esclavo. La magnitud ε_Σ evita sumar voltios y amperios, pero no reemplaza los RMSE dimensionales. La mejora conserva $\Delta\%$ de la ecuación (5.45).

La Tabla 5.32 presenta cada celda como *sin PINN/con PINN*. La última columna de cada modo corresponde al indicador conjunto.

Tabla 5.32
RMSE DIMENSIONAL DEL ENSAYO FACTORIAL DEL ESCENARIO 3.

Filtro perturbado	modo conectado a la red				modo isla			
	M [A]	$S1$ [A]	$S2$ [A]	Δ_{Σ}	M [V]	$S1$ [A]	$S2$ [A]	Δ_{Σ}
ninguno	3.651/3.693	1.054/1.065	1.055/1.066	-1.08 %	6.705/9.766	0.537/0.594	0.537/0.594	-35.93 %
maestro	3.622/3.661	1.055/1.066	1.056/1.067	-1.05 %	28.539/10.345	0.549/0.564	0.549/0.564	+60.73 %
esclavo 1	3.651/3.693	4.605/4.512	1.056/1.067	+1.47 %	6.435/9.270	3.122/2.765	0.528/0.582	+3.35 %
esclavo 2	3.651/3.693	1.056/1.066	4.614/4.519	+1.49 %	6.435/9.270	0.528/0.582	3.122/2.765	+3.35 %
tres unidades	3.623/3.662	4.603/4.510	4.612/4.517	+1.81 %	30.153/7.859	3.135/2.767	3.135/2.767	+39.16 %

En conexión a la red el lazo de potencia mantiene el error acotado antes de identificar. La corrección cambia menos de 0.10 A cualquiera de los tres RMSE y el indicador conjunto queda entre -1.08 % y +1.81 %. La identificación puede ser precisa sin producir una separación visible porque el control base ya absorbe el desajuste en este punto.

En isla el efecto depende de la unidad perturbada. Cuando cambia solo el filtro del maestro, su RMSE de tensión disminuye de 28.539 a 10.345 V, mientras los dos esclavos sanos cambian menos de 0.02 A. Cuando cambia solo un esclavo, el RMSE de su corriente baja de 3.122 a 2.765 A. Sin embargo, la tensión del maestro aumenta de 6.435 a 9.270 V y el beneficio conjunto se reduce al 3.35 %. Con los tres filtros perturbados, el maestro baja de 30.153 a 7.859 V y cada esclavo de 3.135 a 2.767 A. La reducción conjunta del 39.16 % no procede de una sola unidad y confirma que las tres correcciones pueden actuar al mismo tiempo.

El caso nominal impide extender esa conclusión a una activación permanente. Sin perturbación, el RMSE de tensión del maestro aumenta de 6.705 a 9.766 V y el indicador conjunto se degrada un 35.93 %. La PINN compensa diferencias pequeñas entre el predictor y la planta aunque el filtro conserve sus valores nominales. Este resultado exige una banda de activación o un criterio de confianza antes de usar la corrección de forma continua.

5.10.2. Identificación propia y sensibilidad cruzada

La Tabla 5.33 compara el caso nominal con la perturbación simultánea de las tres unidades.

Tabla 5.33
FACTORES IDENTIFICADOS EN LOS CASOS NOMINAL Y PERTURBADO.

modo	condición	maestro		esclavo 1		esclavo 2	
		ρ_{Lf}	ρ_{Cf}	ρ_{Lf}	ρ_{Cf}	ρ_{Lf}	ρ_{Cf}
red	nominal	0.948	1.016	0.989	0.996	0.989	0.996
red	tres unidades	1.410	1.484	1.498	1.502	1.498	1.502
isla	nominal	1.044	1.038	0.987	0.996	0.987	0.996
isla	tres unidades	1.201	1.586	1.490	1.501	1.490	1.501

En modo conectado a la red los esclavos estiman el punto [1.5, 1.5] con errores inferiores al 0.16 %. El maestro entrega [1.410, 1.484], con un error máximo del 6.02 %. En isla los esclavos conservan errores inferiores al 0.65 %, mientras el maestro subestima L_f y alcanza

un error del 19.95 %. Las instancias de los esclavos mantienen por tanto una identificación precisa en los dos modos. La del maestro conserva la dependencia con el modo de operación observada en los escenarios anteriores.

Los casos aislados permiten separar error propio y respuesta cruzada. El primer indicador de la Tabla 5.34 es el mayor error de los dos factores de la unidad perturbada. El segundo es el mayor cambio porcentual que presenta cualquier factor de una unidad sana respecto de su testigo nominal con PINN.

Tabla 5.34
ERROR PROPIO Y RESPUESTA CRUZADA DEL ENSAYO AISLADO.

Modo	Filtro perturbado	Error propio máximo	Respuesta cruzada máxima
red	maestro	6.010 %	0.016 %
red	esclavo 1	0.142 %	0.025 %
red	esclavo 2	0.144 %	0.025 %
isla	maestro	15.534 %	0.025 %
isla	esclavo 1	0.376 %	2.529 %
isla	esclavo 2	0.376 %	2.529 %

En conexión a la red la mayor respuesta de una red sana es 0.025 %. En isla, perturbar el maestro cambia menos de 0.025 % los factores de los esclavos. El caso menos separado ocurre al perturbar un esclavo, cuando la estimación del maestro cambia un 2.529 %. La otra red esclava permanece dentro del 0.046 %. La diferencia tiene una lectura física. Los tres convertidores comparten el PCC y una perturbación del esclavo modifica la trayectoria de tensión que observa el maestro, pero no hace que el esclavo sano identifique el filtro ajeno.

Los dos esclavos responden además de forma simétrica. Cuando reciben la misma perturbación, la mayor diferencia entre factores homólogos es 2.8×10^{-5} . En conjunto, estas medidas respaldan que cada PINN responde principalmente a su propio filtro. No prueban independencia exacta, porque el acoplamiento eléctrico común permanece y es más visible en isla.

5.10.3. Efecto sobre el seguimiento

La Figura 5.57 reúne el indicador conjunto de la ecuación (5.49). Los RMSE dimensionales que lo forman permanecen en la Tabla 5.32.

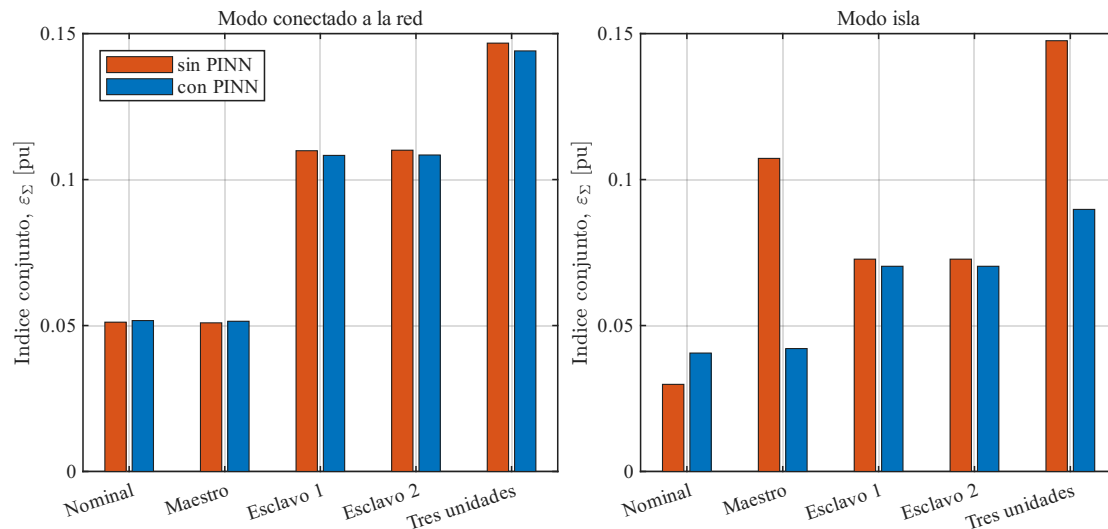


Figura 5.57. Índice conjunto según la ubicación de la perturbación.

La figura confirma dos regímenes. En conexión a la red las barras son casi coincidentes porque los lazos externos ya mantienen el seguimiento. En isla la corrección del maestro domina la reducción cuando su filtro está perturbado. La perturbación aislada de un esclavo produce una mejora local que queda parcialmente compensada por el cambio de la tensión formada. Por eso la barra conjunta apenas disminuye, aunque la corriente del esclavo perturbado sí mejora.

El nivel $K = 1.5$ del ensayo factorial se conserva porque permite comparar la ubicación de la perturbación bajo una condición común. Ese punto no produce la mayor separación visual entre las respuestas sin y con PINN. Para seleccionar las formas de onda se ejecutó un barrido propio del Escenario 3 en modo isla, con los tres filtros perturbados en la misma dirección. El barrido recorrió $1.75 \leq K \leq 3.50$ en G2 y $1.75 \leq K \leq 2.75$ en G4.

Los niveles de mayor mejora del Escenario 2 no se trasladan directamente. Al imponer G2 con $K = 4.00$, el RMSE de v_C aumenta de 126.93 a 134.78 V. En G4 con $K = 2.95$ crece de 34.39 a 126.69 V. La corrección simultánea de los tres filtros modifica la trayectoria del sistema y exige seleccionar el punto dentro del propio Escenario 3. El barrido fija $K = 2.50$ para ambas direcciones. En ese nivel la tensión del maestro y la corriente de entrada del esclavo muestran una compensación amplia y estable, mientras G4 ya se degrada en $K = 2.75$. El mismo punto se repite en conexión a la red. De este modo, las diferencias entre las figuras de ambos modos proceden del régimen de control y no de un nivel de perturbación distinto.

Las cuatro figuras siguientes muestran una fase del sistema balanceado durante cuatro ciclos. Cada figura dispone cuatro filas para la tensión en bornes del inversor, la corriente de entrada al filtro, la tensión del condensador y la corriente de salida. Las columnas separan el maestro y un esclavo, ambos sin y con PINN. El segundo esclavo no se repite porque su respuesta coincide con la del primero dentro de la precisión cuantificada en la subsección anterior.

La tensión u_{inv} es la acción aplicada y no posee una referencia independiente. Las otras tres filas incluyen un trazo rojo punteado. En modo conectado a la red se emplean las referencias del controlador descritas en el Capítulo 4. En el esclavo se reconstruyen con

P_{ef}^{ref} , Q_{ef}^{ref} y la tensión del PCC mediante las mismas ecuaciones del C-Script. En isla, v_C^{ref} es la referencia directa del maestro, pero sus corrientes no tienen un lazo de seguimiento propio. Para compararlas sin introducir un nuevo control se construyen dos referencias equivalentes de evaluación,

$$\begin{aligned}
 i_{o,\alpha}^{ref,eq} &= \frac{2 v_{C,\alpha}^{ref} P^{ref} + v_{C,\beta}^{ref} Q^{ref}}{3 (v_{C,\alpha}^{ref})^2 + (v_{C,\beta}^{ref})^2}, \\
 i_{o,\beta}^{ref,eq} &= \frac{2 v_{C,\beta}^{ref} P^{ref} - v_{C,\alpha}^{ref} Q^{ref}}{3 (v_{C,\alpha}^{ref})^2 + (v_{C,\beta}^{ref})^2}, \\
 i_{f,\alpha}^{ref,eq} &= i_{o,\alpha}^{ref,eq} - \omega_{nom} C_f v_{C,\beta}^{ref}, \\
 i_{f,\beta}^{ref,eq} &= i_{o,\beta}^{ref,eq} + \omega_{nom} C_f v_{C,\alpha}^{ref}.
 \end{aligned} \tag{5.51}$$

El superíndice *ref* conserva la convención del Capítulo 4. La marca *eq* indica que se trata de una referencia equivalente utilizada solo para evaluar las corrientes del maestro en isla. En la última línea se usa la capacitancia real de la condición simulada. Las trayectorias de la ecuación (5.51) expresan el reparto solicitado y la ley de corrientes del condensador. No se inyectan en el C-Script ni convierten al maestro en seguidor de corriente. Esta distinción permite leer las cuatro filas sin atribuir al control una consigna que no posee.

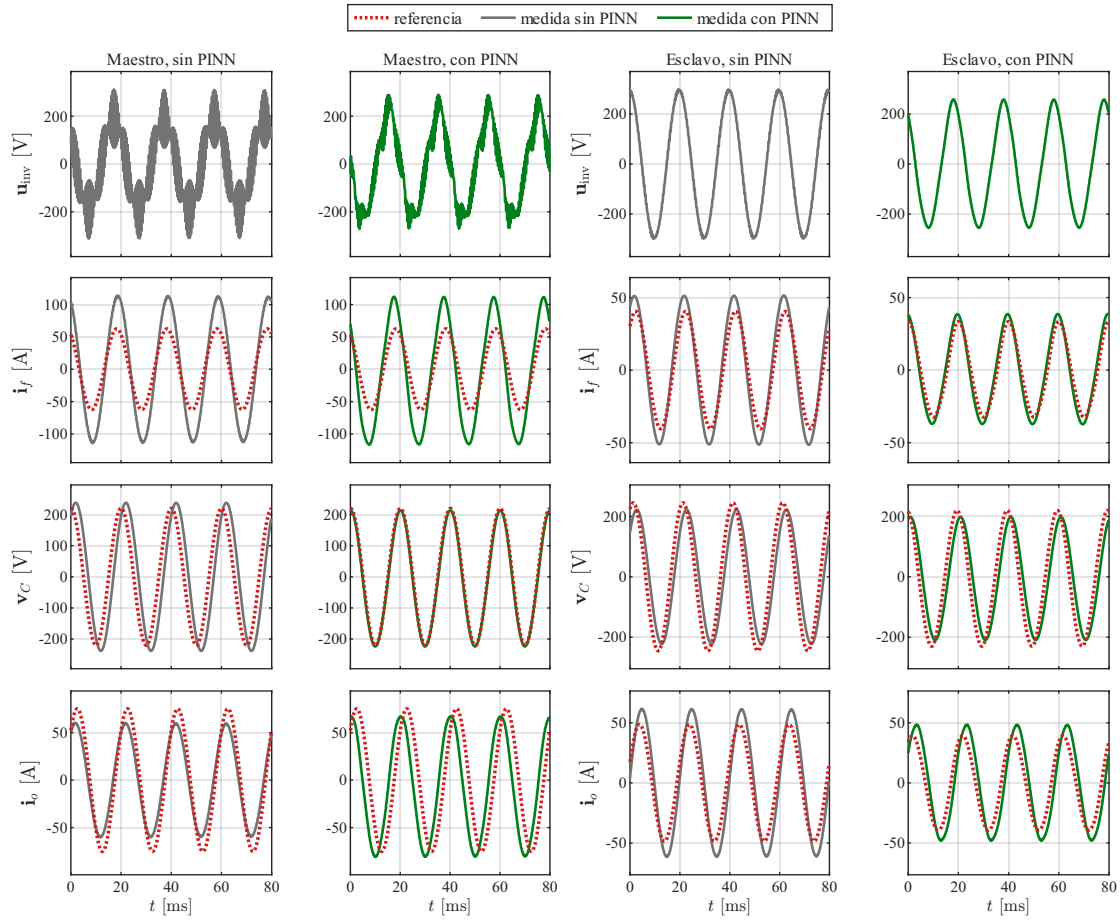


Figura 5.58. Escenario 3, formas de onda de G2 en modo isla.

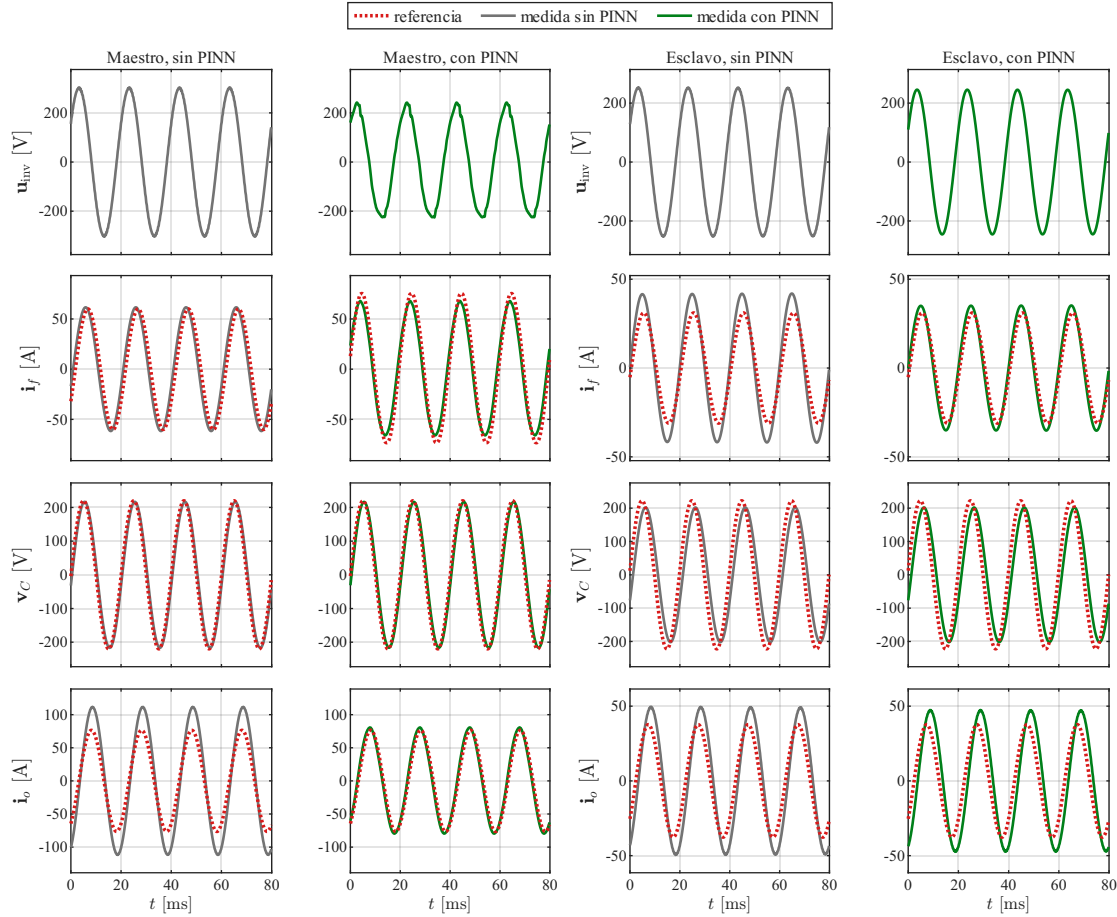


Figura 5.59. Escenario 3, formas de onda de G2 en modo conectado a la red.

En G2, cuyas formas de onda recoge la Figura 5.58, se aplica $K_{Lf} = K_{Cf} = 2.50$ a los tres filtros. La corrección reduce el RMSE de v_C del maestro desde 95.43 hasta 6.78 V, equivalente a una mejora del 92.89 %. La tercera fila muestra la recuperación simultánea de amplitud y fase. En el esclavo, que sí regula i_f , el RMSE de esa corriente disminuye de 9.69 a 5.42 A, una mejora del 44.0 %. La tensión interna del LCL baja de 74.34 a 69.07 V y la corriente de salida cambia de 14.38 a 15.08 A. La corrección actúa con claridad sobre la variable gobernada, pero no elimina el desajuste de todos los estados del filtro.

El maestro estima [2.215, 2.422] y el esclavo [2.419, 2.478]. Pese a la subestimación de ρ_{Lf} del maestro, la tensión se recupera. Sus corrientes equivalentes no siguen la misma tendencia. El RMSE de i_f cambia de 36.58 a 41.18 A y el de i_o de 15.48 a 41.14 A. La PINN corrige el predictor de tensión, pero el maestro en isla no dispone de un lazo que obligue a mantener el reparto de corriente de la ecuación (5.51). La diferencia es una limitación del control distribuido y no un error de identificación del esclavo.

La Figura 5.59 repite G2 con $K_{Lf} = K_{Cf} = 2.50$ en conexión a la red. El maestro estima [2.505, 2.498] y reduce el RMSE de i_o desde 26.14 hasta 7.73 A, una mejora del 70.44 %. El RMSE de i_f disminuye de 12.12 a 10.53 A, mientras el de v_C cambia de 20.16 a 19.87 V. La red externa fija la tensión y el aporte principal se concentra por ello en la corriente de salida, que es la variable usada para evaluar este modo.

El esclavo estima $[2.729, 2.491]$. Su RMSE de i_f baja de 8.95 a 4.86 A, equivalente a una mejora del 45.70 %. En cambio, el error de v_C permanece entre 67.43 y 67.71 V, y el de i_o cambia de 12.78 a 15.04 A. La corrección mejora la corriente calculada por su predictor, pero no obliga a que todos los estados del LCL se acerquen a sus referencias. Esta separación es coherente con la estructura local del control del esclavo.

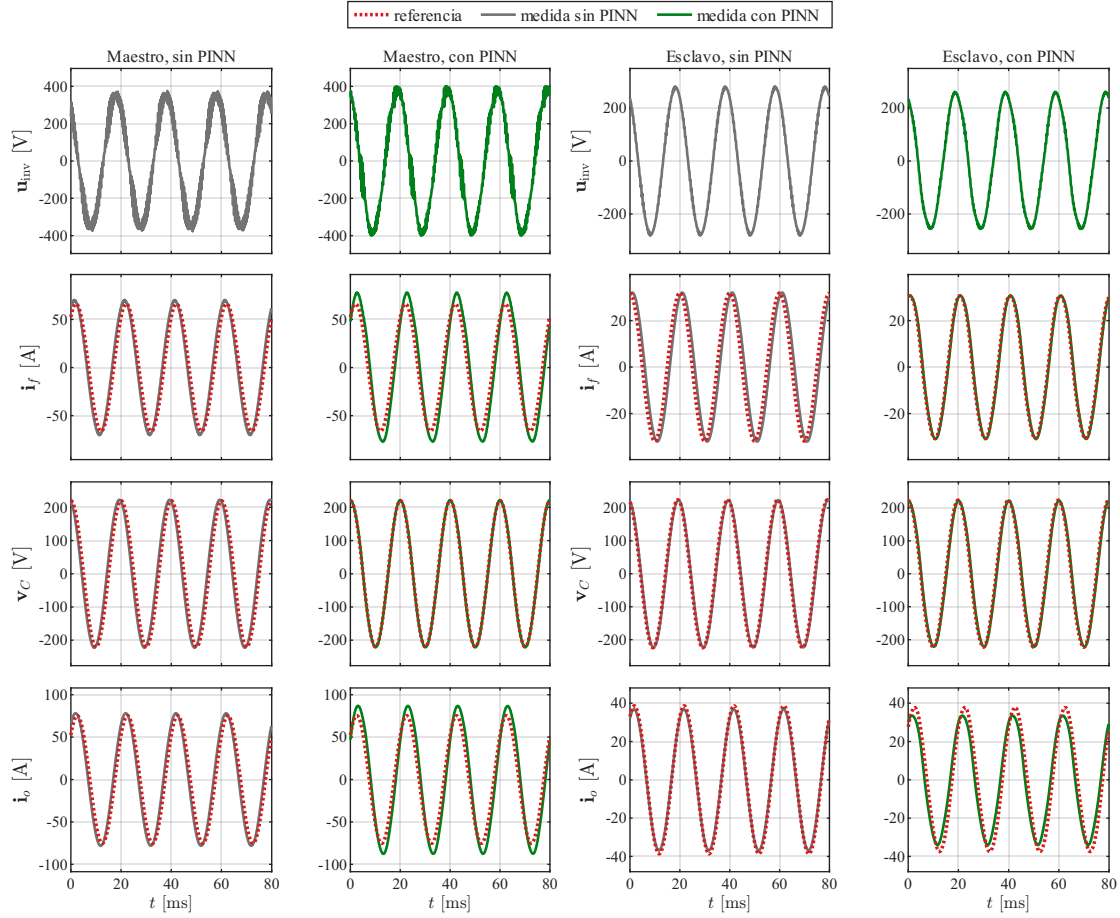


Figura 5.60. Escenario 3, formas de onda de G_4 en modo isla.

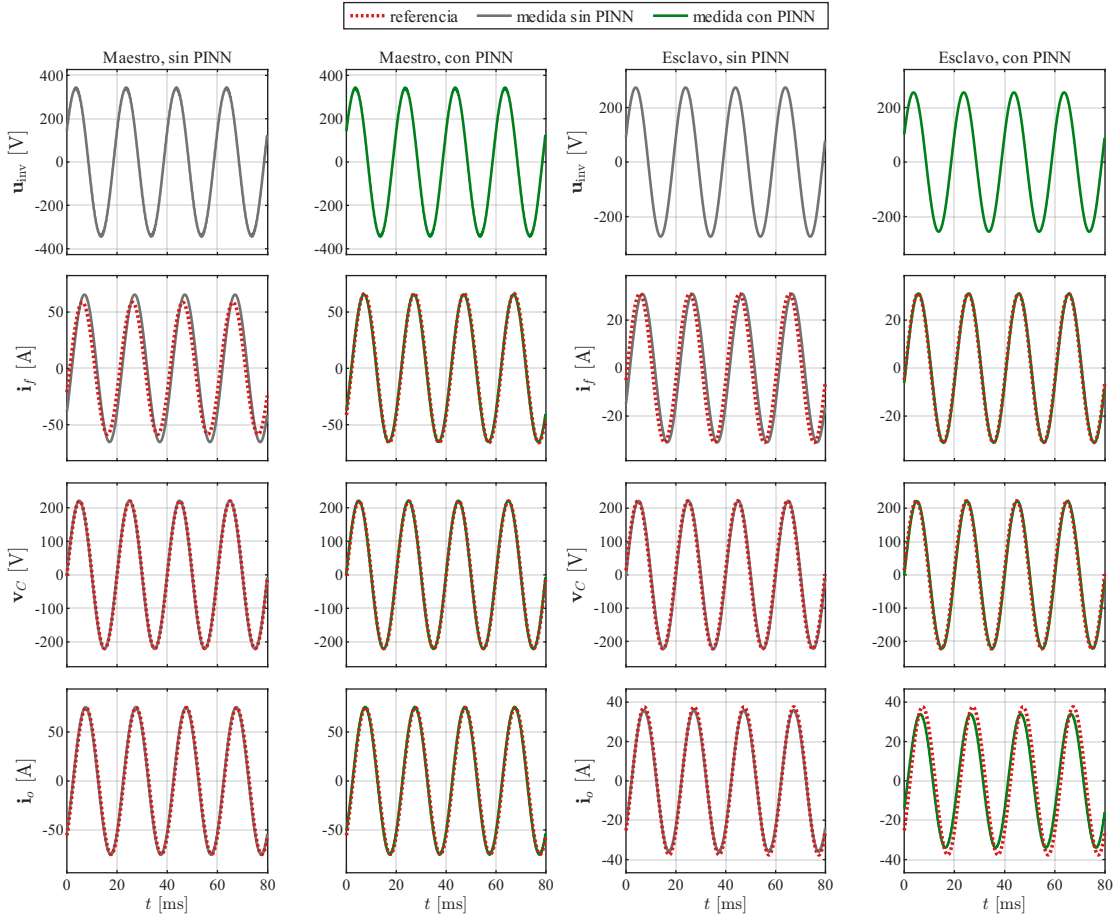


Figura 5.61. Escenario 3, formas de onda de $G4$ en modo conectado a la red.

En $G4$, cuyas formas de onda recoge la Figura 5.60, se combinan $K_{Lf} = 2.50$ y $K_{Cf} = 0.400$. El RMSE de v_C del maestro disminuye de 34.89 a 3.29 V, equivalente a una mejora del 90.57 %. El esclavo presenta el cambio más claro de sus cuatro filas. El RMSE de i_f baja de 7.19 a 1.46 A, una mejora del 79.7 %. Su tensión interna cambia de 11.80 a 11.49 V y la corriente de salida de 1.70 a 7.30 A. De nuevo, la variable directamente gobernada es la que recoge el aporte principal.

El esclavo estima $[2.528, 0.404]$, mientras el maestro entrega $[2.545, 0.308]$. La capacitancia queda bien identificada en el esclavo y subestimada en el maestro. En este último, el RMSE de i_f cambia de 10.44 a 13.11 A y el de i_o de 11.84 a 13.24 A. La comparación confirma que la mejora de tensión no debe presentarse como una mejora simultánea de todas las corrientes.

En la Figura 5.61, $G4$ conserva $K_{Lf} = 2.50$ y $K_{Cf} = 0.400$. El maestro estima $\rho_{Lf} = 2.523$ y $\rho_{Cf} = 0.395$. El RMSE de i_f disminuye de 12.24 a 2.67 A, una mejora del 78.18 %. El error de i_o permanece prácticamente constante, de 3.642 a 3.644 A, y el de v_C cambia de 5.522 a 5.527 V. En este caso los lazos externos ya mantienen la corriente de salida cerca de su referencia, mientras la corrección absorbe el desajuste en el estado interno que utiliza el predictor.

El esclavo estima $[2.964, 0.404]$. Aunque ρ_{Lf} sobreestima el factor verdadero, su RMSE

de i_f disminuye de 7.31 a 0.93 A, una mejora del 87.31 %. El error de v_C baja de 11.75 a 11.43 V, pero el de i_o aumenta de 1.67 a 7.83 A. El resultado vuelve a acotar la conclusión. La identificación distribuida corrige con fuerza la variable gobernada por cada unidad, pero no equivale a una corrección simultánea de todas las variables del filtro.

5.10.4. Alcance de la extensión

Los ensayos sostienen tres conclusiones. Primero, cada red identifica principalmente el filtro al que está asociada. La respuesta cruzada máxima es 0.025 % en conexión a la red y 2.529 % en isla, mientras los esclavos perturbados estiman sus dos factores con errores inferiores al 0.65 %. Segundo, las tres correcciones pueden operar de forma simultánea. Con los tres filtros perturbados en $K = 1.5$, el indicador conjunto disminuye un 39.16 % en isla. Tercero, el beneficio se concentra en la variable gobernada por cada convertidor. En los puntos de forma de onda en isla, el maestro reduce el error de v_C más de un 90 % y el esclavo reduce el de i_f entre un 44.0 % y un 79.7 %. En conexión a la red, G2 reduce el error de i_o del maestro un 70.44 %, mientras G4 reduce el de i_f un 78.18 %. En el esclavo, la mejora de i_f alcanza el 45.70 % en G2 y el 87.31 % en G4.

El resultado no demuestra ausencia completa de interferencia ni garantiza una mejora de i_o . La red común acopla las trayectorias, la identificación del maestro en isla conserva un error de 19.95 % en L_f y la activación nominal degrada el indicador conjunto. En G4 conectado a la red, por ejemplo, el error de i_f disminuye con fuerza, pero el de i_o del esclavo aumenta. La extensión queda validada como identificación local simultánea y como corrección de las variables directamente gobernadas dentro de las condiciones ensayadas. Para convertirla en una estrategia de reparto completo faltan dos elementos. El primero es un criterio de activación alrededor del caso nominal. El segundo es un lazo externo que cierre la corriente de salida o la potencia de cada unidad sin alterar la formación de tensión del maestro.

Capítulo 6

Conclusiones y Recomendaciones

Este capítulo responde las preguntas que motivaron la memoria y delimita el alcance de cada respuesta. Las cifras provienen de la campaña descrita en el Capítulo 5 y de los manifiestos del Apéndice A.

6.1. La configuración sobre la que se responde

Las conclusiones se apoyan en una comparación construida sobre un criterio explícito. El Escenario 1 emplea control predictivo de conjunto finito, que decide cada $T_s = 100 \mu s$ y cuya frecuencia de conmutación efectiva, medida sobre las compuertas en 24 ventanas, vale 2333 Hz en modo conectado a la red. El Escenario 2 emplea control predictivo modulado con la portadora fijada en 2330 Hz, esa misma medición redondeada, y muestreo sincronizado de doble actualización, $T_s = 214.6 \mu s$.

De ahí el rasgo que condiciona toda la comparación. Ambas estrategias conmutan a frecuencia equiparable, pero el esquema modulado opera con un periodo de muestreo 2.1 veces mayor, de modo que el esfuerzo de conmutación deja de ser la diferencia dominante. La comparación no aísla, sin embargo, una única variable, porque también cambian el periodo de muestreo, la acción admisible y los lazos complementarios. El esfuerzo computacional y las pérdidas de conmutación quedan fuera de la equiparación y no se contabilizan.

Conviene fijar además cuál es la magnitud sobre la que se concluye. En los dos escenarios la variable regulada en modo isla es la tensión del condensador v_C , que es la que el voltímetro entrega, la que entra al vector de la PINN y la que evalúa el error cuadrático medio de régimen. La tensión de la rama, $v_C + R_{fc}(\dot{i}_f - \dot{i}_o)$, no se mide ni se controla, se reconstruye dentro del predictor de corriente porque es la que aparece en el balance del inductor. Controlar, identificar y medir recaen por tanto sobre la misma magnitud, condición sin la cual la mejora reportada no sería atribuible a la corrección.

La campaña paramétrica abarca 491 condiciones evaluadas en los dos modos y con las dos configuraciones de control, 1964 simulaciones por escenario de control, que suman 3928 corridas pareadas entre los dos escenarios. La métrica es el RMSE de régimen de la variable controlada sobre los últimos 90 ms de un registro de 1 s, con umbral de $\pm 5\%$ para clasificar en rescate, neutralidad y daño.

Sobre esa configuración se responde. La sección siguiente recorre los objetivos uno a

uno y la Tabla 6.1 resume ese recorrido, de modo que el cumplimiento no dependa de una asociación implícita por parte del lector.

6.2. Cumplimiento de los objetivos, uno a uno

La Tabla 6.1 vincula los objetivos del Capítulo 2 con su evidencia en el Capítulo 5, distinguiendo cumplimiento completo, acotado y parcial.

Cuatro objetivos requieren acotar su alcance: el tercero identifica L_f y C_f , no R_{fc} , cuya salida queda fijada por normalización, el sexto transfiere el método con pesos entrenados por escenario, el noveno demuestra separación alta en un factorial, no independencia exacta en barrido continuo, y el séptimo observa sensibilidad de ρ_{Lf} al despacho, sin aislar un lazo causal.

El objetivo general. El objetivo general pedía evaluar la incorporación de una red neuronal al control predictivo del maestro y cuantificar su efecto sobre el seguimiento y la robustez en los dos modos. Está cumplido en los términos en que se enunció, evaluar y cuantificar, no demostrar superioridad. La respuesta que esta memoria sostiene es condicional y está medida. La corrección aporta cuando el conocimiento del modelo es el cuello de botella del seguimiento, y no aporta cuando el límite activo es físico o cuando otro lazo ya ha absorbido el error de régimen. Las dos mitades de esa respuesta se apoyan en la misma campaña y con el mismo criterio, y ninguna se omite.

La Tabla 6.1 condensa el recorrido anterior, con el respaldo de cada objetivo y el veredicto que puede sostenerse sobre él. El método de cada uno queda descrito en el cuerpo del capítulo y no se repite aquí.

Tabla 6.1
MATRIZ DE CUMPLIMIENTO DE LOS OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

Obj.	Respaldo	Veredicto
1	Secciones 4.4, 5.5.2 y 5.6.2.	Topología maestro-esclavo implementada y operativa en los dos modos.
2	Secciones 4.4.4–4.4.6 y 5.1.	Las ecuaciones corresponden a las señales y horizontes del controlador embebido.
3	Secciones 4.6.3–4.6.6 y 5.2.	La PINN estima L_f y C_f con precisión útil dentro del dominio evaluado.
4	Sección 4.7, campañas de las Secciones 5.5 y 5.6.	La corrección produce rescate amplio, junto con casos neutros y desfavorables.
5	Sección 5.4, curvas y balance de las Secciones 5.5–5.7.	El aporte depende del modo, de la familia y del límite físico activo.
6	Secciones 4.5 y 5.6.	La arquitectura y el método se transfieren con un ajuste propio para el esquema modulado.
7	Sección 5.8 y Tabla 5.25.	En red se verifican aporte, flujo residual y absorción, y en isla el reparto interno. La sensibilidad de ρ_{Lf} al despacho queda cuantificada en ambos esquemas.
8	Secciones 5.1 y 5.7, Tabla 5.15.	Queda distinguido el desajuste corregible de las restricciones físicas.
9	Sección 5.10, ensayo factorial de 20 simulaciones.	Cada red responde principalmente a su propio filtro, con separación alta y no con independencia exacta.

6.3. Identificación paramétrica y efecto en lazo cerrado

La PINN identifica los factores de escala del filtro con fidelidad suficiente para corregir el predictor a lo largo de dos décadas de perturbación. El error mediano de identificación, $|\ln(\rho/K)|$, es de 3.5 % para ρ_{Lf} y 2.3 % para ρ_{Cf} en el Escenario 1, y de 6.9 y 4.2 % en el Escenario 2.

La degradación al pasar al esquema modulado se aproxima a la razón de periodos de muestreo. El cociente entre ambos errores medianos de ρ_{Lf} vale 2.00 frente a una razón de muestreo de 2.15. Esta proximidad constituye una observación propia de esta memoria, porque la literatura documenta que el esquema modulado permite un muestreo más largo y una frecuencia fija, pero no cuantifica su contrapartida sobre un identificador en línea. La atribución debe acotarse. No se realizó una ablación que aísle el periodo de muestreo del resto de diferencias, entre ellas el modulador, el amortiguamiento activo y los lazos externos, de modo que es una regularidad medida con una interpretación compatible y no una relación causal demostrada.

La corrección mejora el seguimiento de forma amplia y sistemática cuando el cuello de botella es el conocimiento del modelo. Sobre las 491 condiciones de cada modo, la proporción de rescates alcanza el 87.8 % en modo conectado a la red y el 66.2 % en isla para el Escenario 1, y el 46.8 y el 75.6 % para el Escenario 2.

La asimetría entre modos se invierte entre escenarios, y esa inversión es informativa. En el conjunto finito la corrección rinde más en modo conectado a la red, donde la variable controlada depende directamente de la inductancia. En el esquema modulado rinde más en isla. En red, el integrador en marco sincrónico ya reduce el error de régimen y deja poco margen adicional. La neutralidad observada es compatible con el desempeño del control base, aunque una ablación del integrador sería necesaria para asignarle toda la diferencia.

El caso nominal sirve de control y revela una limitación que debe declararse. Con la planta igual al modelo la corrección es neutra en tres de los cuatro cuadrantes, entre -4.2 y $+0.7$ %. La excepción es el Escenario 2 en isla, donde el error pasa de 8.29 a 11.34 V, un incremento absoluto de 3.06 V que la métrica relativa amplifica hasta el -36.9 % por tener un denominador pequeño. Es el único caso nominal clasificado como daño. Sin desajuste no existe un error paramétrico que corregir y la degradación es compatible con la dispersión residual de la inferencia, sin que el ensayo permita aislarla como causa única. De ahí la recomendación de habilitarla de forma condicionada.

La Sección 5.9 compara cinco parejas por modo, con igual inicialización, presupuesto y ponderación adaptativa de datos. Sin física, el MSE retenido baja en las diez parejas, mientras con ella, baja el residuo físico en las diez. La identificación mejora consistentemente en isla, no por igual en cada parámetro de red. Los seis intervalos del ensayo inicial de seguimiento incluyen cero, por lo que no se demuestra una ventaja general en lazo cerrado. La comparación separa precisión de etiquetas y consistencia del modelo. El resultado es coherente con la forma de entrenamiento, cargada de datos exactos y abundantes, en la que el término de datos domina la identificación y la física aporta sobre todo consistencia con el modelo discreto.

6.4. Los límites del método y las dos fronteras físicas

El alcance de la corrección está acotado por tres fronteras que no deben confundirse. Las cotas corresponden a modelos reducidos: $K_{Cf} > K_v T_s / C_f$ al de dos estados y $K_{Lf} > 1/2$ al predictor nominal de corriente. Con corrección y factores constantes, este último exige $0 < \rho_{Lf} / K_{Lf} < 2$. No son límites universales del conjunto finito ni del sistema completo, ni excluyen los rescates de la Tabla 5.2. La ventana simulada contrasta desempeño, no sustituye polos del orden completo. La segunda es la de margen de actuación, el límite de tensión sintetizable del convertidor. La tercera es la de observabilidad, que explica por qué un parámetro perfectamente estable puede resultar incompensable, y que motivó excluir R_{fc} del espacio sobre el que esta memoria concluye.

El balance energético del Capítulo 5 aporta firmas distintas para las dos fronteras de la cola superior. El resultado fortalece la interpretación física sin presentarla como una ablación de la planta.

En G4 con PINN, la salida cae de 17.8 a 6.7 kW entre $K = 4.30$ y 4.35 del Escenario 1, y de 16.39 a 7.33 kW entre 3.55 y 3.60 del Escenario 2, en registros de un segundo. Sin pérdidas capacitivas equivalentes, la firma es compatible con pérdida de seguimiento por actuación limitada. G4 conserva $L_f C_f$ y reduce la contribución resistiva al amortiguamiento al aumentar Z_0 , aunque esas identidades no explican por sí solas las recuperaciones aisladas.

En G2 del Escenario 1 sin PINN, de $K = 2$ a 4.60, la entrada pasa de 21.2 a 35.3 kW, la salida permanece cerca de 17.6 kW y la razón de pérdida capacitiva a salida crece de 0.20 a 0.99. En el Escenario 2, $K = 4.35$ produce salidas de -6.88 kW sin PINN y -4.67 kW con ella, por lo que se absorbe potencia para sostener pérdidas. El balance mide ese reparto, no una frontera.

La Tabla 5.3 fija las fronteras manuales. En G4 del Escenario 2, el primer divergente es $K = 3.40$ con PINN y 3.45 sin ella, sobre 15 s, y en el Escenario 1 es 4.30 y 4.20, respectivamente. En G2 con PINN se obtiene 4.25 en el Escenario 2 y 4.10 en el Escenario 1, y sin PINN, este último alcanza 4.65. Los puntos del balance corto no sustituyen estos límites. La corrección modifica la respuesta, no la tensión disponible.

Las afirmaciones de estabilidad tienen horizonte finito. Las campañas evalúan un registro de 1 s y los ensayos de atribución llegan a 60 s. Donde esta memoria indica que una condición no diverge debe entenderse ausencia de divergencia observada durante el horizonte evaluado, no estabilidad asintótica. No se presupone una ley de crecimiento del tiempo de divergencia al aproximarse a la frontera, y ninguna ventana finita descarta por sí sola una divergencia posterior.

El espacio de perturbación es un ensayo de esfuerzo y no un modelo de envejecimiento. La banda $[0.05, 5]$ excede entre uno y dos órdenes de magnitud los criterios de fin de vida de un condensador, que sitúan el reemplazo en una caída del 20 % para tecnología electrolítica y del 5 % para película metalizada [38]. Las limitaciones descritas aparecen en caídas superiores al 70 %, muy fuera de la región representativa.

La arquitectura se transfirió entre esquemas mediante ajustes independientes. El reescalado actúa sobre el modelo discreto del filtro y pudo integrarse tanto con conjunto finito como con modulación. Cada PINN se entrenó, sin embargo, con el periodo de muestreo, las señales y la distribución de datos de su escenario. La diferencia de exactitud entre ambos esquemas no demuestra que una misma red pueda reutilizarse sin reajuste.

Lo validado es la portabilidad de la arquitectura, de la pérdida y del procedimiento de integración.

6.5. Validación complementaria

La evaluación ante variaciones de consigna mide el sistema, y no solo el corrector. La Sección 5.8 recorre el despacho de los tres convertidores en por unidad de la potencia nominal de la carga, de modo que $(P) = 1$ es el punto en que las unidades cubren la carga por sí solas y la red queda flotando, por debajo la red aporta el déficit y por encima la absorbe. Ese anclaje es el que da sentido físico a cada columna del barrido.

El desajuste entre lo despachado y lo que la carga consume lo toma la red cuando está conectada, y el maestro cuando no lo está. Es la diferencia de fondo entre los dos modos, y explica por qué la misma escalera se lee distinto en cada uno. En modo conectado a la red los niveles son puntos de despacho del conjunto. En isla, donde no hay dónde verter, la escalera gobierna el reparto entre el maestro formador y los esclavos, y $(P)/2$ es la fracción nominal de la carga que asume el maestro.

La campaña de consignas cubre el intervalo ensayado y revela una sensibilidad propia del identificador modulado. Los conjuntos de entrenamiento recorren (P) entre 0.25 y 2.00 y (Q) entre -1.00 y 2.00. Por tanto, la variación de ρ_{Lf} no se explica por una consigna ausente durante el ajuste. Su recorrido mediano es del 3.01 % en el Escenario 1 y del 21.67 % en el Escenario 2, con un peor caso del 58.50 % en este último. La evidencia es consistente con una menor identificabilidad de L_f cuando intervienen la modulación, la retención de la acción y los lazos complementarios que el modelo físico reducido no representa por completo. El ensayo localiza la limitación, pero no separa esas causas.

La identificación distribuida muestra separación alta, no independencia exacta. El Escenario 3 de la Sección 5.10 cruza cinco ubicaciones de perturbación, dos modos y dos configuraciones de control en veinte simulaciones pareadas. Con las tres unidades perturbadas, los esclavos estiman sus factores con errores inferiores al 0.16 % en red y al 0.65 % en isla. La sensibilidad cruzada máxima es del 0.025 % en red y del 2.53 % en isla. Cuando los tres filtros se perturban, el RMSE normalizado del sistema mejora un 39.16 % en isla y un 1.81 % en red. En el punto nominal de isla, en cambio, activar las tres redes aumenta el error un 35.93 %. La extensión es viable en el punto evaluado, pero el maestro en isla y la habilitación sin desajuste siguen siendo sus principales limitaciones.

6.6. Contribución central

Los dos escenarios no comparten el mismo límite de tensión sintetizable, y esa diferencia no procede de modular. El conjunto finito elige entre los ocho estados y dispone del hexágono completo, cuyo círculo inscrito vale $V_{dc}/\sqrt{3}$. El esquema modulado, con modulación senoidal sin inyección de secuencia cero, queda limitado a $V_{dc}/2$, un 13.4 % menos. Es una decisión de implementación compatible con parte de la desventaja del esquema modulado en los niveles altos de perturbación. Incorporar una componente homopolar elevaría su límite hasta el del conjunto finito sin tocar el hardware, y queda registrada como mejora inmediata. Es un resultado que no se buscaba.

La contribución de esta memoria es una metodología interpretable para corregir el modelo interno de un control predictivo mediante identificación paramétrica en línea, junto con un procedimiento de evaluación que mide su efecto sin ocultar los resultados neutros ni los desfavorables. Los dos escenarios muestran que la corrección aporta cuando el conocimiento del modelo limita el seguimiento. Donde no aporta, los resultados pueden relacionarse con mecanismos plausibles y contrastables, como un lazo que ya reduce el error, un convertidor con margen de tensión agotado o una circulación elevada de energía en el filtro. La separación explícita entre observación, interpretación y causalidad es lo que distingue este trabajo de una comparación puramente estadística.

6.7. Recomendaciones y trabajo futuro

1. **Refinar la habilitación condicionada.** La Sección 5.9.6 ya evalúa una banda con persistencia e histéresis. Sus resultados indican que la corrección conviene en isla y no ante desajustes moderados en modo conectado a la red, y que una banda común no detecta cambios de 10 % en L_f en isla. Falta una banda dependiente del modo y de la precisión de cada factor, con confianza o excitación, sin ajustarla sobre la campaña de prueba.
2. **Aporte de la física con datos escasos.** Repetir la comparación emparejada de la Sección 5.9 reduciendo los escenarios de ajuste o evaluando fuera del rango de K entrenado, donde el residuo físico podría compensar la falta de datos. Conviene además una tasa de aprendizaje de s_d y s_p que permita a la ponderación alejarse del reparto igual.
3. **Robustez de medición y discretización.** Añadir ruido, cuantización y retardo controlados a las mediciones, con una condición sin perturbación como referencia, para determinar si las diferencias discretas del vector de entrada amplifican el ruido en los factores y desde qué nivel conviene deshabilitar la corrección.
4. **Residuo del horizonte como indicador de confianza.** Contrastar la predicción a $k+3$ construida con los factores vigentes frente a la trayectoria efectivamente medida, y usar ese residuo como medida en línea de la validez de la estimación. No exige inferencias adicionales, porque reutiliza la predicción que el control ya calcula, y aportaría precisamente el indicador que la recomendación anterior necesita.
5. **Registro directo del margen de tensión.** Instrumentar el índice de modulación y la fracción de tiempo en saturación. El balance energético ya respaldó por la vía de la energía cuál de las dos familias está limitada por tensión, de modo que esta medida deja de ser el único camino a la atribución, pero sigue siendo la más directa y permitiría fijar la frontera con resolución mejor que el paso de la rejilla.
6. **Refinar el registro del esquema modulado.** Con la potencia de salida evaluada en el nodo de la rama capacitiva el balance cierra en el Escenario 1 con una mediana del 0.1 %, mientras en el Escenario 2 se queda entre el uno y medio y el dos y medio por ciento. Ese resto es compatible con un desfase de medio periodo de muestreo entre los canales de tensión y de corriente del registro, y la forma de zanjarlo es repetir un subconjunto de la campaña con varias muestras por periodo de control. La vía alternativa, medir directamente la corriente del enlace en lugar de reconstruirla, ya

se ensayó y queda descartada como atajo, porque entrega un registro prácticamente equivalente según la comprobación de la Sección 5.7.

7. **Caracterización de la estabilidad asintótica.** Determinar, mediante extensión del criterio de Jury al orden completo del lazo o mediante campañas de ventana larga acotadas a las regiones críticas, el nivel de perturbación a partir del cual cada familia deja de sostenerse indefinidamente.
8. **Ablación del periodo de muestreo.** Repetir la campaña del Escenario 2 con el periodo de muestreo del Escenario 1, manteniendo el resto de la configuración, para aislar la contribución del muestreo a la degradación de la identificación.
9. **Ablación de la sensibilidad al despacho.** Los conjuntos de entrenamiento ya cubren todo el intervalo de consignas evaluado. Conviene repetir un subconjunto del Escenario 2 anulando por separado la modulación, la retención, el amortiguamiento activo y los integradores, o incorporar esas dinámicas al residuo físico. Ese estudio permitiría decidir qué mecanismo origina el recorrido del 21.67 % de ρ_{Lf} sin confundirlo con extrapolación de los datos.
10. **Campaña completa de la identificación distribuida.** El factorial del Escenario 3 establece la viabilidad de tres identificadores simultáneos en veinte casos y cuantifica su sensibilidad cruzada. Falta extenderlo a un barrido continuo en K y aplicar el mismo criterio de rescate, neutralidad y daño de los escenarios principales. También conviene incorporar una banda de habilitación alrededor del nominal, porque en isla las tres redes activas aumentan el RMSE normalizado un 35.93 % cuando no existe perturbación. Esa extensión permitiría declarar un rango efectivo de compensación para los esclavos y evaluar si la sensibilidad cruzada del 2.53 % crece cerca de las fronteras físicas.
11. **Contraste directo contra observadores clásicos.** La Sección 3.4 argumenta la elección frente al filtro de Kalman y al estimador ARX-RLS sobre la base de la estructura del problema, y no sobre una comparación experimental, que no se realizó. Implementar uno de esos estimadores sobre la misma planta y la misma campaña permitiría cuantificar el intercambio entre coste de ajuste fuera de línea, coste de cómputo en línea y precisión de la identificación, que es la comparación que esta memoria deja enunciada y no resuelta.
12. **Mantener la reproducibilidad del ajuste.** Las veinte redes nuevas conservan semillas, particiones, pesos adaptativos e historiales y permiten la comparación controlada de la Sección 5.9. Este registro debe mantenerse en futuras campañas, y no reconstruye retrospectivamente las inicializaciones históricas.
13. **Evaluación de las funciones desactivadas.** Cuantificar en campañas específicas el aporte del control por pendiente y de la separación de secuencia, hoy implementados pero inactivos, ante perturbaciones que los requieran.
14. **Validación en banco.** Queda fuera del alcance de esta memoria y se plantea como continuación natural. Exigiría seleccionar filtro y límites eléctricos con componentes reales, verificar escalas, retardos y presupuesto de ejecución, y solo entonces incorporar una PINN reajustada para esa planta.

Apéndice A

Configuración reproducible y trazabilidad

Este anexo reúne únicamente la información necesaria para localizar los modelos, reproducir los resúmenes numéricos y verificar la correspondencia entre las ecuaciones y el C-Script. Los desarrollos teóricos permanecen en el Capítulo 4 y las figuras complementarias se trasladan al Anexo B.

A.1. Artefactos y alcance de la reproducción

Tabla A.1
PAQUETES DE EVIDENCIA CONSERVADOS PARA LA REPRODUCCIÓN.

Paquete	Contenido	Qué permite verificar
Escenario 1	Modelo PLECS, códigos del maestro y los esclavos, pesos exportados y campaña paramétrica.	Predictor de conjunto finito, 491 condiciones y comparaciones pareadas.
Escenario 2	Modelo PLECS, códigos, portadora, pesos exportados y campaña paramétrica.	Predictor modulado, doble actualización, lazos complementarios y las mismas 491 condiciones.
Consignas	Configuración, registros pareados, métricas y posproceso.	Escalera por unidad, siete condiciones y resultados de la Sección 5.8.
Escenario 3	Modelo distribuido, pesos de las tres unidades y registros factoriales.	Identificación local, sensibilidad cruzada y comparaciones de la Sección 5.10.
Figuras	Programas de posproceso y archivos vectoriales finales.	Correspondencia entre cada tabla, forma de onda y registro de origen.

Cada paquete incluye un manifiesto técnico con nombres internos, tamaños y huellas SHA-256. Esos datos sirven para comprobar integridad durante la entrega digital, pero no aportan una lectura física y por ello no se imprimen en la memoria. Los registros, C-Scripts y programas de posproceso permiten contrastar las ecuaciones, las métricas y las figuras sin depender de una ruta local de trabajo.

A.2. Configuración y conteos vigentes

Dos tablas fijan lo que hay que conservar para reproducir las campañas. La Tabla A.2 lista las magnitudes que permanecen congeladas en toda la comparación, de modo que cualquier diferencia entre corridas provenga del factor aplicado y no de la configuración. La Tabla A.3 recoge los conteos y las ventanas de los conjuntos finales.

Tabla A.2
PARÁMETROS CONGELADOS DE LA COMPARACIÓN.

Magnitud	Valor	Alcance
Frecuencia fundamental	50 Hz	Carga y red.
Escenario 1	$T_s = 100 \mu s$	Actualización a 10 kHz y conmutación efectiva medida de 2333 Hz.
Escenario 2	$f_c = 2330 \text{ Hz}$, $T_s = 214.6 \mu s$	Doble actualización a 4660 Hz.
Bus y tensión de fase	800 V, 220 V de valor máximo	Comunes a ambos escenarios.
Filtro maestro	$L_f = 3 \text{ mH}$, $C_f = 500 \mu F$, $R_{fc} = 0.5 \Omega$	Valores del predictor nominal.
Carga trifásica	$R = 1.03 \Omega$, $L = 3.3 \text{ mH}$	$P = 35.01 \text{ kW}$ y $Q = 35.24 \text{ kVAr}$.
Reparto	1/2–1/4–1/4	Maestro y dos esclavos.
Perturbación	$(K_{Lf}, K_{Cf}) \in [0.05, 5]^2$, $K_{Rfc} = 1$	R_{fc} no se perturba.
Evaluación	últimos 90 ms de 1 s	Umbral de clasificación $\pm 5 \%$.

Tabla A.3
CONTEOS Y VENTANAS DE LOS CONJUNTOS FINALES.

Conjunto	Simulaciones	Pares o ventanas pareadas	Ventana
Escenario 1	1964	982 pares	[0.90, 0.99] s.
Escenario 2	1964	982 pares	[0.90, 0.99] s.
Consignas, barrido principal	56	28 pares y 168 ventanas pareadas	Últimos 80 ms de cada tramo.
Consignas, ensayos complementarios	50	25 pares	Ventana final de cada corrida.
Identificación distribuida	20	10 pares	Últimos 0.1 s de registros de 1.2 s.
Auditoría de conmutación	24 ventanas	seis compuertas	Registro dedicado sin <i>aliasing</i> .

En cada escenario de control, los barridos correlacionados aportan 99, 96, 99 y 96 condiciones para G1–G4, el muestreo no correlacionado G5 aporta 100 y se añade el nominal. Las 491 condiciones se evalúan en dos modos y en las variantes sin y con PINN, de donde resultan 1964 simulaciones. La columna **clase** de estos CSV ya incorpora el umbral vigente de $\pm 5 \%$ y el piso de sensibilidad de 0.5 V o A, según el modo.

Tabla A.4
EJECUCIONES DE LA CAMPAÑA DE CONSIGNAS RETENIDAS COMO EVIDENCIA.

Bloque	Corridas	Ventanas o pares
Barrido principal, dos escenarios, siete condiciones, dos modos y dos controles	56	168 ventanas pareadas
Series cruzadas de P y Q , dos escenarios, tres niveles y dos controles	24	12 pares
Ajuste del cruce reactivo, tres niveles y dos controles	6	3 pares
Entrada de la red, seis niveles de consigna y dos controles	12	6 pares
Ensayos de cierre, cuatro condiciones y dos controles	8	4 pares
Total	106	168 ventanas y 25 pares

La Tabla A.4 desglosa las ejecuciones bloque a bloque. Dos corridas de verificación, una por escenario, se emplearon para comprobar el reparto antes de la campaña y no ingresan en los resultados. Los ciento seis ensayos restantes se conservan como evidencia.

A.3. Tabla maestra de fronteras

La Tabla A.5 reúne indicadores de campañas de uno y quince segundos, conservando sus criterios. La referencia manual es la Tabla 5.3, y ninguno de estos registros garantiza estabilidad fuera de su ventana.

Las filas fr usan $fr = |V_{C,1}|/|V_{ref,1}|$ (Sección 5.6.9): último sano con $fr \geq 0.95$ contiguo al nominal, primero degradado con $0.60 \leq fr < 0.95$ y primero divergente con $fr < 0.60$. Las filas t_{div} registran el centro de la primera ventana de 100 ms con $fr < 0.90$, buscada desde 0.20 s hasta quince segundos. En ellas, último sano significa sin divergencia registrada, y no se evalúa una categoría intermedia equivalente. La última columna cuenta recuperaciones por encima de la frontera (Sección 5.5.6).

Se muestran G2 y G4 por su relación con el balance, mientras G1 y G3 permanecen en la evidencia completa y G5 no sigue un único K . M1 y M2 identifican campañas cortas de los Escenarios 1 y 2, y M2L, la de quince segundos. El paquete vincula filas con CSV, configuración, duración, criterio y niveles. La Tabla 5.3 conserva la comprobación manual, con divergencia antes de dos segundos en los casos límite del Escenario 1.

Origen de las filas manuales. Las fronteras de la Tabla 5.3 se obtuvieron ejecutando a mano los dos modelos de la plataforma, `ESCENARIO 1 - FCS-MPC V10.1 RFC CORREGIDO.plecs` y `ESCENARIO 2 - MPC MODULADO V10.1 RFC CORREGIDO.plecs`, con la configuración de la campaña y con los factores K_{Lf} y K_{Cf} fijados en el bloque de parámetros según el grupo. Cada nivel se repitió con la corrección activada y desactivada, y se observó la evolución completa hasta declarar el último nivel estable y el primero divergente. En el Escenario 1 la divergencia de los casos límite aparece dentro de los primeros dos segundos, mientras el Escenario 2 empleó la ventana de quince segundos. Esa verificación directa sobre el modelo es la fuente de esas filas, sin postproceso intermedio.

Tabla A.5
FRONTERAS REGISTRADAS Y CRITERIO EMPLEADO EN CADA CAMPAÑA.

Esc.	Grupo	Modo	Var.	Vent. [s]	Crit.	Últ. sano	1. ^{er} degr.	1. ^{er} div.	Recup.
1	G2	grid	sin	1	<i>fr</i>	4.25	4.30	—	0
1	G2	grid	con	1	<i>fr</i>	4.45	4.50	—	0
1	G4	grid	sin	1	<i>fr</i>	5.00	—	—	0
1	G4	grid	con	1	<i>fr</i>	5.00	—	—	0
1	G2	isla	sin	1	<i>fr</i>	4.70	4.75	—	0
1	G2	isla	con	1	<i>fr</i>	4.70	4.75	5.00	0
1	G4	isla	sin	1	<i>fr</i>	3.80	—	3.85	3
1	G4	isla	con	1	<i>fr</i>	3.35	3.40	4.35	0
2	G2	grid	sin	1	<i>fr</i>	4.25	4.30	—	0
2	G2	grid	con	1	<i>fr</i>	4.35	4.40	—	0
2	G4	grid	sin	1	<i>fr</i>	5.00	—	—	0
2	G4	grid	con	1	<i>fr</i>	5.00	—	—	0
2	G2	isla	sin	1	<i>fr</i>	2.85	2.90	4.15	0
2	G2	isla	con	1	<i>fr</i>	4.20	4.25	4.35	0
2	G4	isla	sin	1	<i>fr</i>	3.55	—	3.60	0
2	G4	isla	con	1	<i>fr</i>	3.50	3.55	3.60	0
2	G2	isla	sin	15	<i>t_{div}</i>	3.00	—	3.05	0
2	G2	isla	con	15	<i>t_{div}</i>	4.20	—	4.25	0
2	G4	isla	sin	15	<i>t_{div}</i>	3.40	—	3.45	0
2	G4	isla	con	15	<i>t_{div}</i>	3.35	—	3.40	0

A.4. Entrenamiento e inferencia reproducible

Registro del ejemplo numérico. La muestra de la Sección 4.6.4 se acompaña de medidas, configuración, pesos desplegados, veintiséis entradas con sus estadísticos y activaciones intermedias. La inferencia se reproduce desde el registro, sin otra simulación ni entrenamiento, y se contrasta con las salidas instantánea y filtrada y los coeficientes. El registrador general expone las salidas calculadas una muestra después. Por ello, los coeficientes de $t = 1.5$ s se leen allí en $t = 1.500\,214\,592$ s, conforme al orden de actualización del C-Script.

A.4.1. Artefactos conservados del entrenamiento

Los checkpoints exportan `trainScenarios` y `valScenarios`: 450 escenarios de ajuste en el Escenario 1, 550 en el 2 y 50 de validación por modo y escenario. `opts` conserva arquitectura, activación, saturación, ponderación por muestra, paciencia y mejor época. Los estadísticos de entrada y salida acompañan a los pesos y a la cabecera `.h`, asegurando igual normalización en entrenamiento e inferencia. Los guiones de la Tabla A.1 regeneran la campaña PLECS.

Se conservan como antecedente doce redes estáticas, con semillas 0, 1 y 2, sus historiales y la campaña de 982 condiciones sin y con corrección (1964 simulaciones). Sus registros no reconstruyen los pesos adaptativos históricos. La Sección 5.9 añade veinte redes emparejadas, cinco semillas por variante y modo, con pesos de pérdida, particiones e historiales completos.

Tabla A.6
CONFIGURACIÓN FINAL DEL ENTRENAMIENTO PARAMÉTRICO.

Elemento	Configuración
Redes	Una para modo conectado a la red y otra para isla.
Arquitectura	Dos capas ocultas de 32 neuronas, activación tanh y tres salidas lineales.
Entradas	26 en modo conectado a la red y 28 en isla.
Salidas	$\hat{\eta}_{Lf}$, $\hat{\eta}_{Cf}$ y $\hat{\eta}_{Rfc}$. La tercera queda congelada por $\mu_{y,Rfc} = \sigma_{y,Rfc} = 0$.
Datos	Escenario 1, 500 escenarios por modo, 450 de ajuste y 50 de validación. Escenario 2, 600 por modo, 550 de ajuste y los mismos 50 de validación.
Optimizador	Adam, tasa inicial 10^{-3} y lote completo.
Parada	5000 épocas, paciencia 150 y cambio mínimo 10^{-5} .
Pérdida	Reparto adaptativo por verosimilitud entre el término de datos y el de física, con tasa propia 2×10^{-5} para los dos escalares y acotamiento $ s_i \leq 10$. La regularización conserva peso fijo $\lambda_r = 10^{-5}$.
Dominio de salida	factores acotados a $[0.05, 5]$.
Error de validación alcanzado	Escenario 1, 0.0049 en modo conectado a la red y 0.0079 en isla. Escenario 2, 0.0157 y 0.0228.

Tabla A.7
ARCHIVOS PRINCIPALES DEL FLUJO FUERA DE LÍNEA.

Archivo	Función
buildDataset_master_param_v3rfc.m	Construcción de características, etiquetas y residuos físicos.
main_training_master_param_v3rfc.m	Configuración del ajuste.
train_master_param_v3rfc.m	Adam, validación y parada temprana.
physicsLoss_master_param_v3rfc.m	Residuo del modelo discreto reescalado.
modelLoss_lb.m	Reparto adaptativo entre los términos de la pérdida.
validatePINN_master_param_v3rfc.m	Evaluación sobre escenarios reservados.
exportPINN_master_param_v3rfc_to_C.m	Exportación de pesos y normalización a C.

Los pesos, sesgos y estadísticos exportados permiten repetir exactamente la inferencia. Los datos crudos de entrenamiento fueron retirados por tamaño, de modo que repetir el ajuste exige regenerar primero la campaña. La reproducibilidad es, por tanto, exacta para la inferencia y condicionada para el entrenamiento.

A.5. Correspondencia con el C-Script

La copia textual indicada en la Tabla A.1 se contrastó con las ecuaciones del Capítulo 4. La Tabla A.8 registra las correspondencias que afectan las conclusiones, sin reproducir listados extensos.

Tabla A.8
TRAZABILIDAD ENTRE IMPLEMENTACIÓN Y FORMULACIÓN.

Función	Evidencia en el C-Script	Correspondencia
Habilitación	Entradas de modo y habilitación, con factores unitarios al apagar la PINN.	Ecuación (4.138).
Inferencia	Salidas logarítmicas, exponencial, acotación $[0.05, 5]$.	Secciones 4.6.3 y 4.7.
Filtrado	Primer orden de 2 ms y reinicio al habilitar o cambiar de modo.	Persistencia descrita en la Sección 4.7.2.
Reescalado	$L_f^{eff} = L_f \rho_{Lf}$, $C_f^{eff} = C_f \rho_{Cf}$ y $R_{fc}^{eff} = R_{fc}$.	Ecuación (4.121).
Retardo	Predicciones en $k + 2$ y tensión en $k + 3$.	Sección 4.4.4.
Escenario 2	Amortiguamiento con <i>washout</i> , integrador de tensión, integradores dq , proyección y saturación.	Secciones 4.5.2–4.5.5.
Consignas	Cuotas nominales, reparto residual en isla y saturación por capacidad aparente derivada del límite de corriente.	Ecuaciones (4.56)–(5.40).

El maestro y cada esclavo reciben veintisiete entradas. En el maestro intervienen en el predictor las ternas de corriente del filtro, tensión del condensador, corriente de salida y tensión del PCC, además del bus, modo y consignas. Las restantes mediciones construyen las potencias de carga y red. En los esclavos se aplica el mismo principio, con el estado adicional de corriente de salida del filtro LCL. Los nombres internos de puertos se omiten porque no son notación física y pueden cambiar sin alterar el modelo.

A.6. Canal auxiliar de R_{fc}

La red neuronal conserva tres salidas. Con `USE_PINN_M=1` las tres atraviesan la rutina de inferencia, pero los encabezados finales fijan $\mu_{y,Rfc} = 0$ y $\sigma_{y,Rfc} = 0$. Por ello la desnormalización produce $\rho_{Rfc} = 1$ para cualquier salida cruda. La alternativa `USE_PINN_M=4` fuerza el mismo valor de forma explícita y ambas opciones son equivalentes para los pesos desplegados.

A.6.1. Asimetría de observabilidad entre C_f y R_{fc}

La Sección 4.6.2 declara que R_{fc} queda fuera del espacio identificado por observabilidad. Aquí se cuantifica ese argumento. En el predictor de tensión de la ecuación (4.119) la contribución de C_f multiplica el valor de la corriente de la rama capacitiva, mientras la de R_{fc} multiplica solo su *diferencia* entre muestras consecutivas,

$$\frac{\partial \hat{\mathbf{v}}_c}{\partial \rho_{Cf}} = -\frac{T_s}{\rho_{Cf}^2 C_f} \mathbf{d}(k-1), \quad \frac{\partial \hat{\mathbf{v}}_c}{\partial \rho_{Rfc}} = R_{fc} \Delta \mathbf{d}. \quad (\text{A.1})$$

Esa asimetría admite una caracterización cerrada que no depende del periodo de muestreo. Para una componente sinusoidal de frecuencia ω se tiene $|\Delta \mathbf{d}| \approx \omega |\mathbf{d}| T_s$, mientras

el término capacitivo vale $|d|T_s/C_f$, de modo que el cociente entre ambos aportes es el número adimensional

$$\frac{R_{fc}|d|}{|d|T_s/C_f} \approx R_{fc}\omega C_f = 0.079 \quad \text{a 50 Hz,} \quad (\text{A.2})$$

en el cual T_s se cancela. El cociente alcanza la unidad en $f = 1/(2\pi R_{fc}C_f) = 637 \text{ Hz}$ y crece linealmente por encima, de manera que la información sobre R_{fc} reside en el *ripple* de conmutación y no en la componente que domina la señal, que es la que la PINN ve con mejor relación señal a ruido.

A.6.2. La resistencia serie del inductor

El caso de R_f es distinto, porque el argumento intuitivo es incorrecto. Sería erróneo afirmar que R_f no cambia con la temperatura, ya que la resistividad del cobre aumenta alrededor de 0.39 % por kelvin y un calentamiento de 60 K eleva la resistencia del bobinado en torno a un 23 %. La variación es real y ocurre en cada arranque, pero su efecto sobre la dinámica que el predictor debe capturar es despreciable. En la ecuación (4.115) la resistencia compite con la reactancia del inductor, y esa relación vale

$$\frac{R_f}{\omega L_f} = \frac{12 \text{ m}\Omega}{0.94 \Omega} = 1.3 \%. \quad (\text{A.3})$$

Un 23 % de un 1.3 % desplaza la impedancia de la rama serie un 0.3 %, por debajo de la resolución con que el identificador distingue factores. Incorporarla al espacio de identificación añadiría un grado de libertad sin información que lo sustente, con el mismo coste que se acaba de cuantificar para R_{fc} .

A.6.3. Registro histórico del canal

Los ensayos pareados y los barridos axiales de la Tabla A.9 pertenecen a modelos preliminares en los que ese canal no estaba congelado. Se conservan como registro del criterio de exclusión, pero no describen la inferencia final ni sustentan conclusiones de la campaña vigente.

Tabla A.9
BARRIDO HISTÓRICO DE R_{fc} , FUERA DEL ANÁLISIS PRINCIPAL.

Escenario	Modo	Mediana [%]	Rescate	Neutro	Daño
1	Red	−44.6	0	15	35
1	Isla	−5.7	0	31	19
2	Red	−14.4	0	42	8
2	Isla	−94.6	4	5	41

A.7. Ensayos auxiliares conservados

A.7.1. Bloques de apoyo desactivados

El SRF-PLL permanece activo. El SOGI-PSD y el control por pendiente están implementados, pero se inhiben en las campañas porque la red es balanceada y el reparto se

impone mediante consignas explícitas. Activarlos añadiría lazos capaces de modificar el mismo error atribuido a la corrección paramétrica. Como no existe una campaña pareada para esos bloques, la memoria no les asigna una mejora cuantitativa.

A.7.2. Sensibilidad a los pesos del FCS-MPC

La Tabla A.10 recorre los pesos del costo sobre el control base, sin corrección paramétrica, y acota cuánto de lo observado en el Capítulo 5 podría atribuirse a la sintonía en lugar de al desajuste del modelo.

Tabla A.10
SENSIBILIDAD DEL CONTROL BASE A LOS PESOS DEL COSTO.

Modo	Condición	Barrido	RMSE
Isla	nominal	$\lambda_v \in [1, 10^5]$	4.7744 V
Isla	$K_{Cf} = 2.24$	$\lambda_v \in [10^3, 10^5]$	13.9755 V
Red	$K_{Cf} = 2.24$	$\Lambda = 3$	30.254 A
Red	$K_{Cf} = 2.24$	$\Lambda = 30$	30.808 A
Red	$K_{Cf} = 2.24$	$\Lambda = 300$	30.854 A

El primer ensayo verifica la invariancia algebraica ante un escalado común del costo. El segundo muestra una variación total del 2.0 % en dos décadas de Λ , menor que la producida por el desajuste paramétrico.

A.7.3. Resistencia virtual y ventanas extendidas

El modelo auxiliar LC con caída virtual plana $u_{ad} = -R_v i_{cap}$, corriente de salida exógena y sin resistencia capacitiva, *washout* ni retardos entrega

$$s^2 + \frac{R_f + R_v}{L_f} s + \frac{1}{L_f C_f} = 0, \quad R_v = 2\zeta \sqrt{\frac{L_f}{C_f}} - R_f. \quad (\text{A.4})$$

Este ζ escala R_v mediante $Z_0 = \sqrt{L_f/C_f}$. No es el amortiguamiento modal implementado, pues quedan R_{fc} , los estados omitidos y, en el esclavo, $L_{f,so} + L_{l,s}$. Los ensayos de 12 a 60 s sobre la cola de G4 modificaron por separado R_v , el integrador de tensión, el factor exacto del modelo y la tensión del bus. Solo elevar V_{dc} de 800 a 1000 V eliminó la divergencia observada en el horizonte evaluado. El resultado respalda la lectura de límite de tensión, pero no constituye una prueba de estabilidad asintótica. En G2, la clasificación se mantuvo al extender la ventana, lo que impide trasladar ese mecanismo a todas las familias.

A.7.4. Alcance del recorte anti-windup del integrador de tensión

El límite del estado del integrador de la Sección 4.5.4 se fija en 110 V, la mitad de la tensión nominal de fase. Conviene una precisión, porque el estado del integrador se suma a la *referencia* y no a la acción de control, de modo que en el peor caso el lazo puede perseguir una amplitud de 330 V en lugar de los 220 V nominales. Es un margen amplio, elegido para que el integrador conserve holgura frente a déficits legítimos de amplitud, y

su contrapartida es que ante perturbación severa la referencia efectiva puede alejarse de la nominal antes de que el recorte actúe.

Esta característica se documenta como elemento de diseño y no como mecanismo de pérdida de control. El ensayo de atribución del Capítulo 5 anuló por completo la ganancia integral y el sistema divergió igualmente, con mayor error inicial. Por tanto, dentro de las condiciones ensayadas, el integrador no es una condición necesaria ni suficiente para explicar la divergencia observada en los niveles altos de perturbación.

A.7.5. Transmisión del filtro washout en las dos frecuencias de interés

La Sección 4.5.3 adopta un pasa-altos de primer orden para separar la parte de la corriente del condensador que conviene amortiguar de la que debe conservarse. Su efecto se obtiene evaluando la magnitud de la ecuación (3.5) en las dos frecuencias de interés, con $|H(j\omega)| = \omega\tau_{ad} / \sqrt{1 + (\omega\tau_{ad})^2}$,

$$|H(j2\pi 50)| = 0.286, \quad |H(j2\pi 129.9)| = 0.613. \quad (\text{A.5})$$

Las dos frecuencias están separadas por $\log_2(129.9/50) = 1.38$ octavas, de modo que ningún pasa-altos de primer orden puede anular una y conservar la otra. El objetivo del bloque no es por tanto separar, sino fijar un sesgo relativo, y las dos magnitudes anteriores lo cuantifican en $0.613/0.286 = 2.14$ a favor de la banda resonante. Lo que importa es qué significa cada una de las dos cifras en términos de diseño.

La magnitud 0.613 describe realimentación, no amortiguamiento modal, pues $R_v H(j\omega)$ cambia módulo y fase y añade un estado. Para el LC reducido del esclavo, $|H(j2\pi 159.96)| \approx 0.691$ con $\tau = 0.95$ ms. Son valores continuos, y la implementación utiliza

$$H_d(z) = \frac{q(1 - z^{-1})}{1 - qz^{-1}}, \quad q = \frac{\tau_{ad}}{\tau_{ad} + T_s},$$

obtenido de la actualización pasa-bajos de la ecuación (4.96). El análisis modal debe incluir este estado y los retardos. La reducción continua del 71.4 % corresponde a la acción virtual a la fundamental, no al error de régimen. Sin el *washout*, el término de amortiguamiento restaría $R_v i_{C,pk} = 84.7$ V sobre una corriente capacitiva de $i_{C,pk} = \omega_{nom} C_f v_{C,pk} = 34.6$ A, y con él resta 24.2 V, que es la perturbación de régimen que la Sección A.7.6 recorre frente a ζ .

A.7.6. Elección del coeficiente de amortiguamiento

Se dimensiona con $\zeta = 0.5$ como compromiso entre dos magnitudes del modelo auxiliar, sin sustituir la validación del controlador. El guion `barrido_zeta_v85.m` reproduce este cálculo.

Las dos magnitudes que se enfrentan. Conviene definir las antes de leer nada, porque son las dos que gobiernan la elección y no miden lo mismo.

La primera es M_r , el **peak resonante** del lazo de segundo orden. Es el máximo relativo a continua, lineal en la ecuación y expresado como $20 \log_{10} M_r$ en tabla y figura. Para

$\zeta < 1/\sqrt{2}$ ocurre en $\omega_r = \omega_n \sqrt{1 - 2\zeta^2}$, distinto de ω_n . Del polinomio se obtiene

$$M_r = \frac{1}{2\zeta\sqrt{1 - \zeta^2}} \quad \text{si } \zeta < \frac{1}{\sqrt{2}}, \quad M_r = 1 \quad \text{si } \zeta \geq \frac{1}{\sqrt{2}}, \quad (\text{A.6})$$

Así, $M_r = 1$ (0 dB) indica ausencia de máximo por encima de continua. Su umbral es $1/\sqrt{2}$, mientras el amortiguamiento crítico es $\zeta = 1$. **Es la magnitud que interesa reducir**, y por eso interesa que sea pequeña.

La segunda es Δv_1 , la **perturbación de la fundamental**, y es el precio que se paga por reducir la primera. La resistencia virtual debería actuar solo sobre el contenido resonante, pero el filtro *washout* que la separa no es ideal y deja pasar una fracción de la componente de 50 Hz, cuantificada en la Sección 4.5.3 como $|H(j\omega_1)| = 0.286$. Esa fracción, multiplicada por la resistencia virtual y por la corriente que el condensador consume a la fundamental, aparece como una caída de tensión espuria sobre la referencia,

$$\Delta v_1 = R_v |H(j\omega_1)| |i_{cap,1}|, \quad |i_{cap,1}| = \omega_1 C_f v_{nom} = 34.6 \text{ A}. \quad (\text{A.7})$$

En la figura se representa normalizada, $\Delta v_1/v_{nom}$, para que se lea como fracción de la tensión que el maestro debe formar. **Es una magnitud que interesa que sea pequeña también**, y ahí está el conflicto, porque $R_v = 2\zeta Z_0 - R_f$ crece linealmente con ζ y arrastra a Δv_1 con ella.

Aumentar la ganancia reduce el *peak* auxiliar y aumenta la acción a la fundamental (Tabla A.11). Su cruce no define un óptimo porque las escalas no comparten función de costo, y el controlador se valida con *washout* e implementación discreta.

Tabla A.11

RECORRIDO ANALÍTICO DEL AMORTIGUAMIENTO SOBRE EL FILTRO LC DEL MAESTRO. M_r ES EL *peak* RESONANTE DE LA ECUACIÓN (A.6) Y Δv_1 LA PERTURBACIÓN DE LA FUNDAMENTAL DE LA ECUACIÓN (A.7). EL SOBREPASO CORRESPONDE A LA RESPUESTA AL ESCALÓN DEL MISMO LAZO DE SEGUNDO ORDEN.

ζ	R_v [Ω]	M_r [dB]	sobrepaso [%]	$\Delta v_1/v_{nom}$ [%]
0.10	0.48	14.02	72.9	2.1
0.20	0.97	8.14	52.7	4.3
0.30	1.46	4.85	37.2	6.5
0.40	1.95	2.70	25.4	8.7
0.50	2.44	1.25	16.3	10.9
0.60	2.93	0.35	9.5	13.2
$1/\sqrt{2}$	3.45	0.00	4.3	15.5
0.80	3.91	0.00	1.5	17.6
1.00	4.89	0.00	0.0	22.0

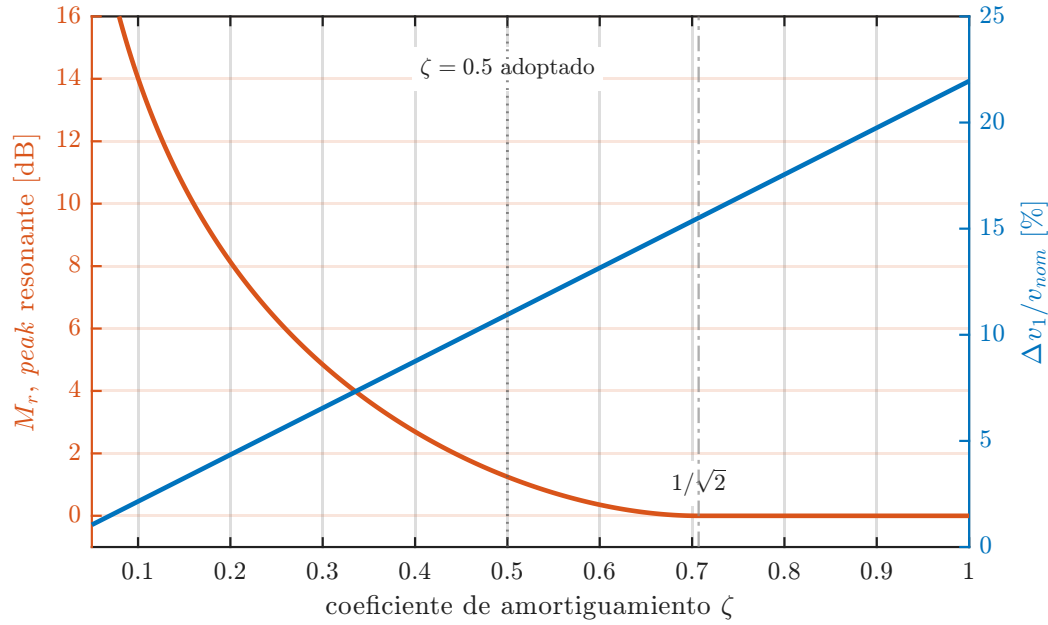


Figura A.1. Recorrido del amortiguamiento. En el eje izquierdo, en naranja, el *peak resonante* M_r de la ecuación (A.6). En el eje derecho, en azul, la perturbación de la fundamental Δv_1 de la ecuación (A.7), normalizada por la tensión nominal. La línea de puntos marca el valor adoptado y la de trazo y punto el amortiguamiento del umbral $1/\sqrt{2}$ de desaparición del máximo resonante, no del amortiguamiento crítico.

Lectura de la figura. Las dos curvas de la Figura A.1 tienen formas muy distintas, y de esa diferencia sale toda la justificación.

La curva naranja, el *peak resonante*, es fuertemente no lineal. Cae de 14 dB en $\zeta = 0.1$ a 2.7 dB en $\zeta = 0.4$, es decir recupera más de once decibelios en la primera mitad del recorrido. A partir de ahí se agota, entre $\zeta = 0.5$ y el umbral $1/\sqrt{2}$ solo quedan 1.25 dB por ganar, y por encima de $1/\sqrt{2}$ la curva es exactamente plana porque no queda un máximo por encima de la ganancia en continua del modelo auxiliar, aunque esto no implica que desaparezcan sus polos o los modos del sistema físico.

La curva azul, la perturbación de la fundamental, es en cambio una recta. No se satura ni se agota, porque Δv_1 es proporcional a R_v y R_v lo es a ζ . Cada incremento de amortiguamiento cuesta lo mismo, independientemente de dónde se parta.

La figura ilustra ese compromiso, no un óptimo entre ejes distintos. Se conserva $\zeta = 0.5$ como referencia analítica de sintonía.

Para $\zeta < 0.4$, el máximo supera 2.7 dB, mientras en 0.6 aún vale 0.35 dB y desaparece en $1/\sqrt{2}$. Alcanzarlo exige una acción fundamental del 15.5 %, frente al 10.9 % con $\zeta = 0.5$.

Con $\zeta = 0.5$, $R_v = 2.437 \Omega$ aproxima los 2.45Ω implementados y produce unos 24.1 V de acción fundamental. No mide el error final ni el margen integral, que dependen también de fase, control y saturación, y se contrastan en simulación.

A.8. Bandas de perturbación realista de los componentes del filtro

La Sección 4.2.2 declara que los valores del filtro son nominales de diseño y remite aquí el desglose. El objeto de este apéndice es doble, situar la banda de perturbación que un filtro real recorre en servicio, y separarla del rango que la campaña de esta memoria recorre a propósito, que es mucho más ancho por las razones de la Sección 4.6.7.

Dos poblaciones de condensadores que no deben confundirse. La literatura de fiabilidad trata junta a una familia de componentes que aquí cumple funciones distintas. El condensador del enlace de continua, $C_{dc} = 2200 \mu\text{F}$ en la Tabla 4.1, soporta tensión continua con *ripple* y suele ser electrolítico de aluminio. Su criterio convencional de fin de vida es una caída de capacitancia hasta el 80 % del valor inicial, equivalente a $K = 0.80$, o bien una duplicación de la resistencia serie equivalente [38]. El condensador del filtro de alterna, C_f , trabaja con tensión y corriente alternas y en un convertidor de esta clase es de película de polipropileno metalizado. Su degradación es distinta y mucho más gradual, y procede de la autorregeneración del dieléctrico, porque cada perforación local aísla una porción de metalización y reduce el área efectiva de las placas, de modo que la capacitancia decae de forma monótona y lenta. Por eso su criterio de fin de vida es estrecho, entre el 2 y el 5 % de pérdida, y no el 20 % del electrolítico. Atribuir a C_f el criterio del enlace de continua cuadruplicaría su banda de degradación real.

En el inductor los mecanismos no son de envejecimiento. La variación dominante de L_f no se acumula con los años, depende del punto de operación y de la temperatura, y es reversible. La permeabilidad del núcleo cae al aproximarse a la saturación, de manera que la inductancia efectiva disminuye dentro del propio ciclo cuando la corriente crece, y lo hace de forma más acusada en núcleos de polvo llevados cerca de su corriente nominal [37]. A eso se suma la caída de permeabilidad con la temperatura, cuya escala es la del calentamiento del componente. El envejecimiento propiamente dicho, por ciclado térmico de las uniones y del entrehierro, aporta unos pocos tanto por ciento a lo largo de la vida útil, y es el mecanismo menos relevante de los tres. La Tabla A.12 reúne los mecanismos con su magnitud, su escala de tiempo y su reversibilidad.

Tabla A.12

MECANISMOS DE PERTURBACIÓN DE LOS COMPONENTES REACTIVOS, MAGNITUD TÍPICA, ESCALA DE TIEMPO Y REVERSIBILIDAD. LOS PORCENTAJES SON RELATIVOS AL VALOR NOMINAL.

Componente	Mecanismo	Magnitud	Escala de tiempo	Reversible
L_f	Tolerancia de fabricación	$\pm 10 \%$	fija	no aplica
L_f	Saturación magnética	-10 a -30%	dentro del ciclo	sí
L_f	Caída térmica de permeabilidad	-5 a -10%	minutos	sí
L_f	Envejecimiento por ciclado térmico	pocos %	años	no
C_f	Tolerancia de fabricación	$\pm 5 \%$	fija	no aplica
C_f	Coefficiente térmico de la película	-2 a -5%	minutos	sí
C_f	Autorregeneración acumulada	-2 a -5%	años	no
C_{dc}	Pérdida de capacitancia del electrolítico	-20%	años	no

Las dos últimas filas de C_f corresponden al criterio de fin de vida del condensador de película, momento en que se sustituye. La fila de C_{dc} se incluye solo para separarla de las anteriores, porque ese componente no pertenece al filtro y la PINN no lo identifica.

Banda compuesta y cómo leer la campaña dentro de ella. Compuestos los mecanismos reversibles con los acumulados, la banda que un filtro sano recorre en servicio es aproximadamente $K_{Lf} \in [0.5; 1.1]$ y $K_{Cf} \in [0.90; 1.10]$. La asimetría entre ambos ejes es el resultado más relevante de este desglose. El inductor admite variaciones de decenas por ciento por saturación y temperatura, reversibles y dentro del propio ciclo, mientras el condensador de película permanece dentro de un diez por ciento durante toda su vida útil con una caída lenta y monótona. De ahí la lectura asimétrica que la Sección 4.6.7 adopta al interpretar los dos ejes del plano de perturbación.

Por qué la campaña excede esa banda a propósito. El barrido de la campaña, $K \in [0.05, 5]$, cubre entre uno y dos órdenes de magnitud más que la banda anterior. La elección es voluntaria y responde a que el objetivo no es reproducir un envejecimiento sino caracterizar la envolvente dentro de la cual la identificación conserva sentido. El desajuste que ve el predictor procede además de la tolerancia de fabricación, de la variación térmica y de la saturación magnética, que actúa dentro del propio ciclo, de modo que valores de K_{Lf} apreciablemente menores que la unidad sí son representativos mientras los de K_{Cf} muy alejados de ella no lo son. Los rangos difieren también entre familias por consistencia interna del diseño, porque los axiales G1 y G3 recorren las dos décadas completas mientras los acoplados G2 y G4 aplican factores recíprocos y su límite inferior queda en $1/5 = 0.2$, valor que coincide con la cota analítica del lazo de tensión reducido del Capítulo 5.

Esa banda es un subconjunto del dominio que la campaña recorre, y queda cubierta con la mayor densidad de puntos de todo el diseño gracias a la rejilla logarítmica. Su lectura en el Capítulo 5 distingue dos tramos. Cerca del nominal el predictor sin corregir ya es competente, el resultado esperable es la neutralidad, y esa es exactamente la situación que formaliza el piso de sensibilidad de la Sección 5.6.2. En el tramo de saturación profunda del inductor, con K_{Lf} apreciablemente menor que la unidad y el condensador cerca de su valor nominal, sí existe desajuste que identificar, y es allí donde la corrección aprendida tiene margen para aportar. Conviene por tanto no leer la envolvente de entrenamiento

como una predicción de condición de servicio, sino como el ensayo de esfuerzo que declara la Sección 4.6.7.

A.9. Cálculo del nivel crítico por el criterio de tensión

La Sección 5.1.5 publica los niveles críticos predichos para el grupo de resonancia fija, $K = 4.37$ en el conjunto finito y $K = 3.37$ en el esquema modulado, pero no desarrolla el cálculo. Este apéndice lo recoge paso a paso con el reemplazo completo de valores, de modo que la predicción quede reproducible sin volver a derivar el criterio.

Punto de partida. La condición de no saturación es la ecuación (5.18),

$$v_{c,\text{pk}} |1 + Z_f(Y_m + Y_C) - R_v H(j\omega) Y_C| \leq V_{\text{máx}}, \quad (\text{A.8})$$

donde el término de amortiguamiento activo interviene solo en el Escenario 2. Todos los parámetros son los nominales de la Tabla 4.1, y ninguna magnitud procede de los registros. En el grupo de resonancia fija los factores son $K_{Lf} = K$ y $K_{Cf} = 1/K$.

Paso 1, la admitancia que ve el maestro. Con $R_{load} = 1.03 \Omega$, $L_{load} = 3.3 \text{ mH}$, $R_l = 0.01 \Omega$ y $L_l = 20 \mu\text{H}$, a $\omega_{nom} = 2\pi \cdot 50$,

$$Z_{load} = 1.0300 + j1.0367 \Omega, \quad 2Z_{load} + Z_l = 2.0700 + j2.0797 \Omega, \quad (\text{A.9})$$

$$Y_m = \frac{1}{2Z_{load} + Z_l} = 0.240413 - j0.241543 \text{ S}. \quad (\text{A.10})$$

Esta magnitud no depende del nivel de perturbación y es común a los dos escenarios.

Paso 2, las dos impedancias que sí dependen de K . La del inductor y la de la rama capacitiva completa, incluida su resistencia serie,

$$Z_f = R_f + j\omega_{nom} L_f K, \quad Z_C = R_{fc} - \frac{j}{\omega_{nom} C_f K_{Cf}}, \quad Y_C = \frac{1}{Z_C}. \quad (\text{A.11})$$

Paso 3, Escenario 1, conjunto finito. El límite de tensión es el círculo inscrito, $V_{\text{máx}} = V_{dc}/\sqrt{3} = 461.9 \text{ V}$, y el término de amortiguamiento se anula porque ese lazo pertenece solo al esquema modulado. Evaluando en $K = 4.37$, con lo que $C_f K_{Cf} = 114.42 \mu\text{F}$,

$$Z_f = 0.0120 + j4.1186 \Omega, \quad Z_C = 0.5000 - j27.8203 \Omega, \quad Y_C = 0.000646 + j0.035933 \text{ S}, \quad (\text{A.12})$$

$$1 + Z_f(Y_m + Y_C) = 1.849717 + j0.990387, \quad |\cdot| = 2.09816, \quad (\text{A.13})$$

y el primer miembro de la ecuación (A.8) vale

$$220 \times 2.09816 = 461.6 \text{ V} \leq 461.9 \text{ V}. \quad (\text{A.14})$$

La desigualdad se satura, de modo que $K = 4.37$ es el último nivel admisible.

Paso 4, Escenario 2, MPC modulado. El límite de tensión baja a $V_{\text{máx}} = V_{dc}/2 = 400.0 \text{ V}$ y aparece el amortiguamiento activo. Con $\tau_{ad} = 0.95 \text{ ms}$ resulta $\omega_{nom}\tau_{ad} = 0.29845$ y

$$H(j\omega_{nom}) = \frac{j\omega_{nom}\tau_{ad}}{1 + j\omega_{nom}\tau_{ad}} = 0.08179 + j0.27404, \quad R_v H(j\omega_{nom}) = 0.20038 + j0.67140 \Omega, \quad (\text{A.15})$$

con $R_v = 2.45 \Omega$. Evaluando en $K = 3.37$, con $C_f K_{Cf} = 148.37 \mu\text{F}$,

$$Z_f = 0.0120 + j3.1762 \Omega, \quad Z_C = 0.5000 - j21.4541 \Omega, \quad Y_C = 0.001086 + j0.046586 \text{ S}, \quad (\text{A.16})$$

$$1 + Z_f(Y_m + Y_C) = 1.622097 + j0.764733, \quad R_v H(j\omega_{nom}) Y_C = -0.031060 + j0.010064, \quad (\text{A.17})$$

de manera que restando el segundo del primero

$$1.653157 + j0.754669, \quad |\cdot| = 1.81726, \quad 220 \times 1.81726 = 399.8 \text{ V} \leq 400.0 \text{ V}. \quad (\text{A.18})$$

También aquí la desigualdad se satura justo en el nivel publicado.

Lectura. Los dos cierres son ajustados, a 0.3 V y 0.2 V del límite respectivamente, y esa proximidad no es casual, es la definición del nivel crítico. Lo que conviene retener es que entre las dos evaluaciones cambian únicamente tres elementos, el límite de tensión, el factor de perturbación y la presencia del término de amortiguamiento, y que con solo esos tres el criterio reproduce dos fronteras separadas por un punto entero de K . El contraste contra la frontera observada se recoge en la Tabla 5.3.

A.10. Deducción del MPC de conjunto continuo y de la proyección de actuación

La Sección 4.5.1 enuncia que la ley *deadbeat* es el mínimo global del subproblema de corriente y que el recorte de magnitud es la solución exacta del problema restringido. Este apéndice desarrolla ambas afirmaciones.

Las tres condiciones de optimalidad

El costo de la ecuación (4.84) es cuadrático en $\mathbf{u}$ porque el predictor de la ecuación (4.86) es afín en ella. La hessiana de la ecuación (4.87) es definida positiva. Y el conjunto de la ecuación (4.85) es convexo y cerrado. Bajo esas tres condiciones la anulación del gradiente de la ecuación (4.88) no es solo necesaria sino también suficiente, de manera que la ecuación (4.89) entrega el mínimo global y no un punto estacionario cualquiera [43]. Que ese mínimo coincida con la ley *deadbeat* clásica no es casual, porque el costo penaliza únicamente el error de seguimiento a un paso y su mínimo es por lo tanto el residuo nulo.

Conviene acotar el alcance de la equivalencia. Dentro de la comparación del núcleo de corriente, el conjunto finito evalúa ocho candidatos y el continuo resuelve la condición de optimalidad en forma cerrada. La equivalencia no se extiende al control completo, porque el Escenario 2 añade lazos externos de tensión, corriente y amortiguamiento que construyen la referencia antes de este costo, y además opera con otro periodo de actualización. La diferencia computacional del núcleo procede del conjunto admisible, mientras el desempeño global también depende de esos lazos y de sus sintonías.

El horizonte de compensación del retardo

El horizonte $k + 2$ compensa un periodo de retardo digital [44]. Durante la muestra k sigue aplicada la tensión calculada en el periodo anterior, de modo que la nueva decisión gobierna el intervalo siguiente y debe llevar la corriente desde el estado predicho en $k + 1$ hasta su referencia en $k + 2$. Referirla a $k + 1$ produciría un desfase sistemático.

Por qué el recorte es una proyección

Como la hessiana de la ecuación (4.87) es un múltiplo positivo de la identidad, las curvas de nivel del costo son circunferencias concéntricas alrededor de $\mathbf{u}_{\alpha\beta}^{ref}$, de modo que minimizar sobre un conjunto equivale a buscar dentro de él el punto más próximo al óptimo irrestricto en distancia euclidiana. Ese punto es por definición la proyección sobre el conjunto, y cuando el conjunto es una bola euclidiana la proyección admite forma cerrada [43]. La ecuación (4.91) recoge el resultado, que es exactamente limitar la magnitud conservando la fase. El esquema entrega por lo tanto el óptimo del problema restringido y no una aproximación suya, propiedad que el conjunto finito no puede reclamar porque su restricción de actuación ya está incorporada en la enumeración.

El *ripple* instantáneo producido por los pulsos permanece en la planta conmutada de PLECS y no se confunde con la acción promedio que realimenta al predictor.

A.11. Verificación del evaluador y tiempo de inferencia

Se verificó el evaluador con los catorce modelos históricos del Escenario 2: dos adaptativos y doce estáticos. Comparten los 50 escenarios retenidos y 174750 muestras por modo. Se comprobó la partición, se reconstruyó la tensión como modulante por $V_{dc}/2$ y se usaron los estadísticos propios de cada red. El MSE recalculado difiere del guardado como máximo 1.86×10^{-9} .

Tabla A.13
IDENTIFICACIÓN ENTRE INICIALIZACIONES SOBRE EL CONJUNTO DE VALIDACIÓN.

Modo	Variante	$100 \ln(\rho_{Lf}/K_{Lf}) $	$100 \ln(\rho_{Cf}/K_{Cf}) $
red	PINN completa	6.48	8.81
		7.31 ± 0.80	9.54 ± 0.48
red	sin física	[6.42, 7.97]	[8.99, 9.84]
		8.10 ± 1.41	12.85 ± 2.27
red	estático $\lambda_p = 5$	[6.93, 9.67]	[10.59, 15.13]
isla	PINN completa	8.26	12.38
		7.27 ± 0.77	9.56 ± 0.22
isla	sin física	[6.39, 7.77]	[9.30, 9.71]
		11.74 ± 0.45	16.49 ± 0.82
isla	estático $\lambda_p = 5$	[11.22, 12.02]	[15.94, 17.43]

Para cada repetición se calcula la mediana de $100|\ln(\rho/K)|$ sobre validación. Las variantes estáticas aportan media, desviación muestral y mínimo-máximo de tres medianas, y este rango no es un IC. La red histórica completa aporta una por modo. Se usa la salida instantánea saturada en $[0.05, 5]$, sin el filtro de 2 ms, como definición del evaluador fuera

de línea. En el controlador desplegado el orden es filtro y después saturación, según la Subsección 4.6.4, y ese factor de régimen en lazo cerrado no se usa aquí.

Sin física, el error mediano medio es menor que con $\lambda_p = 5$ en ambos parámetros y modos. En isla, las tres medianas también quedan bajo la red adaptativa histórica, mientras en red depende del parámetro y la semilla. Este antecedente cambia física y ponderación a la vez, y la comparación aislada actual se presenta en la Sección 5.9.1.

En la campaña histórica sin física, la mejora mediana del seguimiento pasa de 69.95 a 71.04 % en isla y de 0.03 a -0.44 % en red. Estas cifras comparan una red estática con la adaptativa desplegada, y no se atribuyen a las cinco parejas nuevas.

Medición en el computador disponible. Se midió inferencia en Intel Core i7-13620H, Windows de 64 bits y MATLAB R2025b Update 4, con seis hilos y sin GPU. Las matrices desplegadas se evaluaron en doble precisión. Frente a `dlnetwork`, la diferencia máxima de factores fue 5.13×10^{-6} en las primeras 1000 muestras por modo.

Tabla A.14
TIEMPO DE INFERENCIA DE LA PINN DEL ESCENARIO 2 EN COMPUTADOR.

Modo	mediana [μ s]	percentil 95 [μ s]	mínimo [μ s]	máximo [μ s]
conectado a la red	3.088	5.654	2.858	9.007
isla	20.348	22.229	9.938	23.407

Tras 100 llamadas de calentamiento se midieron 100 bloques de 100 inferencias sobre un vector retenido fijo por modo. La Tabla A.14 resume el tiempo medio por llamada de cada bloque. Incluye normalización, tres capas afines, dos tanh, desnormalización, exponencial y saturación, pero excluye adquisición, características, filtro temporal y MPC. La diferencia entre modos de esta tabla pertenece al evaluador y no se reproduce en el controlador desplegado, según muestra la medición siguiente.

Medición dentro de la simulación. El C-Script desplegado mide su propio tiempo de cómputo con el reloj del sistema. Tras un calentamiento de 500 pasos acumula los ticks de la función de actualización completa y los de la inferencia, y publica su promedio en `dbg_t_CPU_update` y `dbg_t_CPU_PINN`. Se ejecutaron dos corridas nominales de tres segundos, una por modo, con la corrección activa y 13 981 pasos registrados en cada una.

Tabla A.15
TIEMPO DE CÓMPUTO DEL CONTROLADOR MAESTRO MEDIDO DENTRO DE PLECS, CASO NOMINAL.

Modo	actualización [μ s]	inferencia [μ s]	resto [μ s]	inferencia [%]	uso de T_s [%]
conectado a la red	12.54	6.68	5.86	53.3	5.8
isla	11.42	7.20	4.23	63.0	5.3

La actualización completa ocupa entre el 5 y el 6 % del periodo de muestreo de 214.6μ s, y la inferencia algo más de la mitad de ese tiempo. Los dos modos quedan en el mismo orden de magnitud, con una diferencia de 0.5μ s en la inferencia, compatible con las dos entradas adicionales del modo isla. Una repetición de un segundo entrega 11.06 y 11.30μ s

de actualización, lo que sitúa la dispersión entre corridas cerca del diez por ciento. El reloj del sistema tiene resolución de un milisegundo, de modo que la cifra es un promedio sobre miles de pasos y no un valor por paso.

Son tiempos en PC, no del C-Script ni de hardware embebido, y el máximo observado no es una cota de peor caso. Se conservan protocolo, tiempos por bloque, modelos y evaluador para reproducirlos.

Apéndice B

Figuras complementarias de resultados

Este anexo conserva la evidencia visual que respalda el Capítulo 5, pero que no es necesaria para seguir su argumento principal. Todas las figuras proceden de las mismas campañas, ventanas y rutinas de posproceso que las incluidas en el cuerpo. La selección se limita a los casos nominales en red, las formas de onda de máxima mejora que no revelan un mecanismo adicional, los diagnósticos de utilización de tensión y las curvas por tramo del ensayo de consignas.

B.1. Casos nominales en modo conectado a la red

B.2. Formas de onda de máxima mejora

B.2.1. Escenario 1, FCS-MPC

B.2.2. Escenario 2, MPC modulado

B.3. Utilización de la tensión disponible

B.4. Casos individuales de G4 en modo conectado a la red

Las figuras siguientes muestran los casos de G4 en red analizados en el Capítulo 5. Las ondas representativas permanecen en el cuerpo, y su contraste con isla distingue seguimiento de corriente y formación de tensión.

B.5. Escenarios no correlacionados del grupo G5

Se conservan las dispersiones del muestreo latino hipercúbico analizadas en el Capítulo 5. Amplían la comprobación más allá de cuatro direcciones paramétricas, sin definir otra frontera.

B.6. Error por tramo en el ensayo de consignas

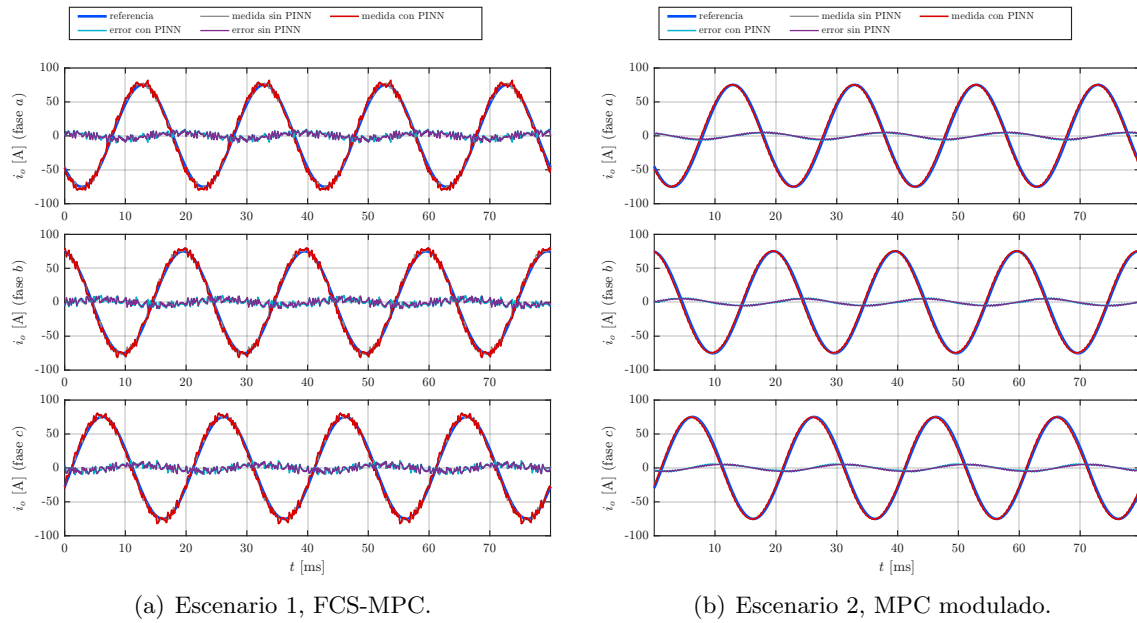
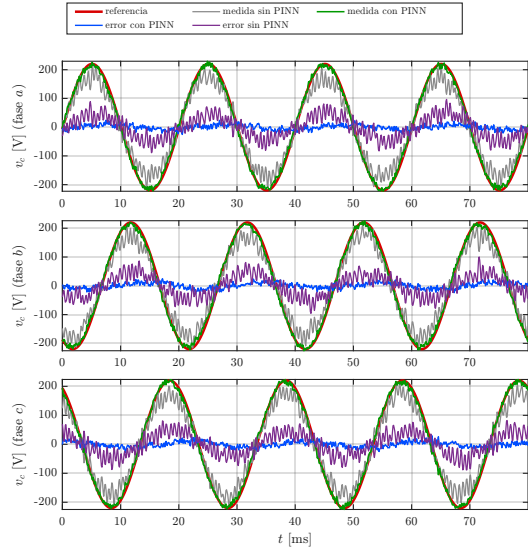
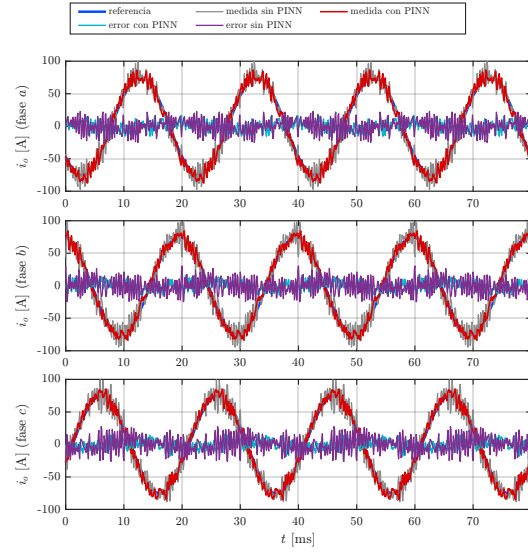


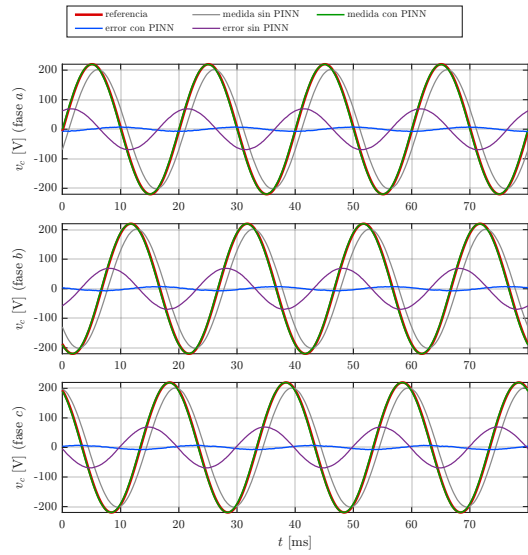
Figura B.1. Formas de onda nominales en modo conectado a la red.



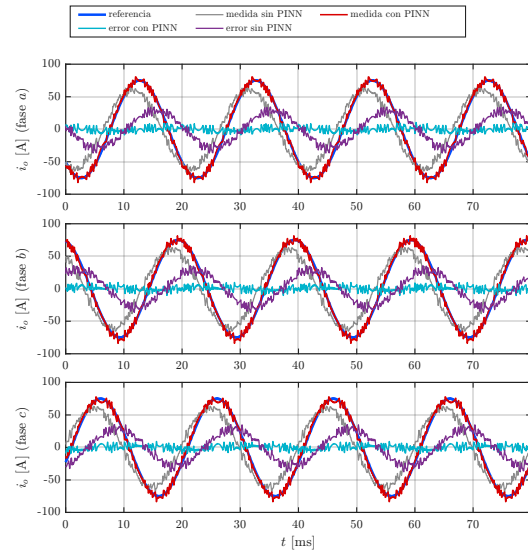
(a) G1, modo isla.



(b) G1, modo conectado a la red.



(c) G3, modo isla.



(d) G3, modo conectado a la red.

Figura B.2. Escenario 1, formas de onda representativas de los grupos axiales G1 y G3.

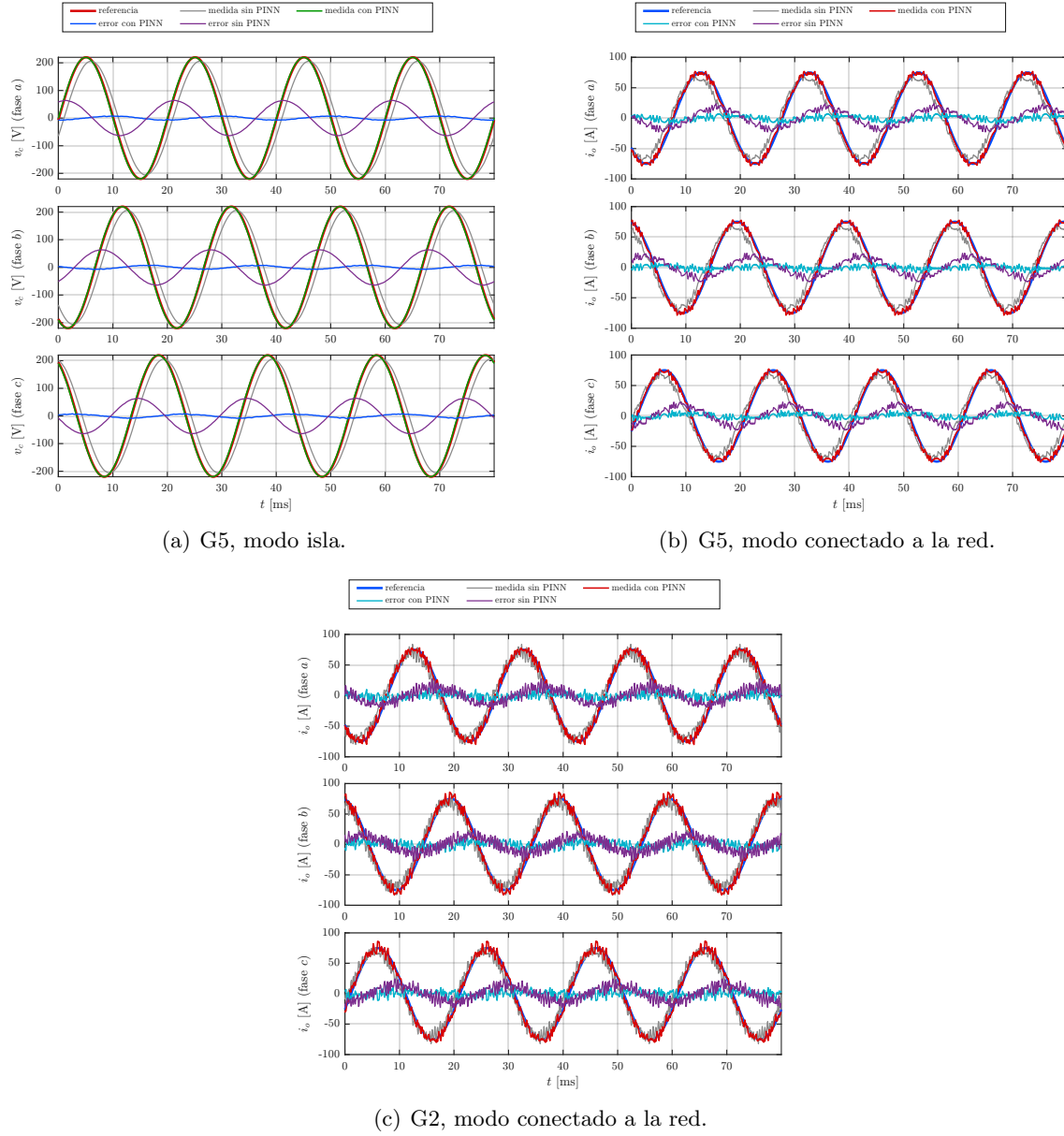
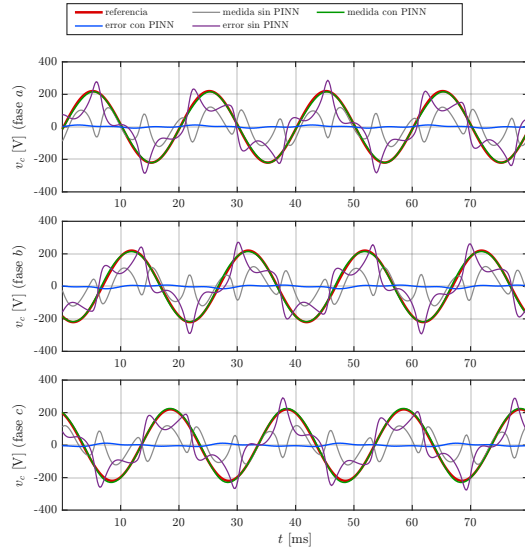
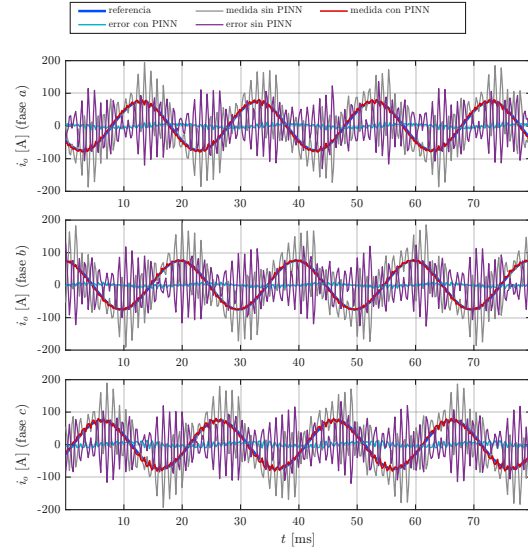


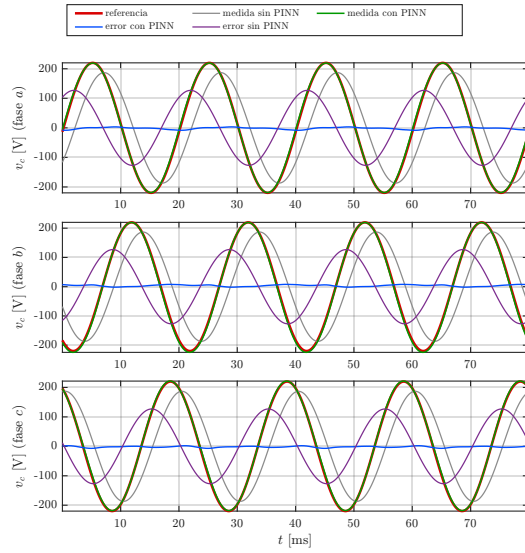
Figura B.3. Escenario 1, formas de onda de máxima mejora de los grupos G5 y G2. La del grupo G4 se presenta en el cuerpo, Figura 5.13.



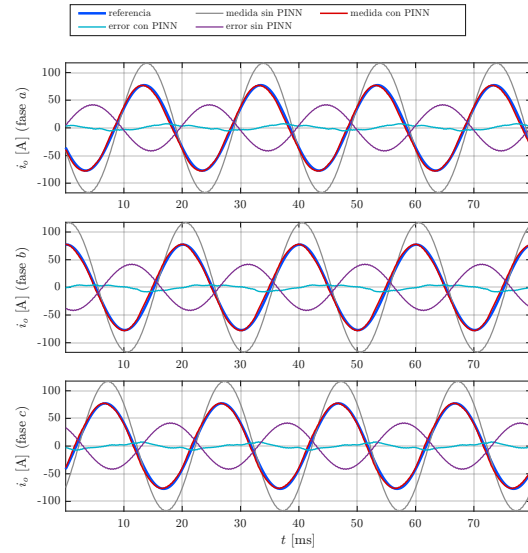
(a) G1, modo isla.



(b) G1, modo conectado a la red.



(c) G3, modo isla.



(d) G3, modo conectado a la red.

Figura B.4. Escenario 2, formas de onda representativas de los grupos axiales G1 y G3.

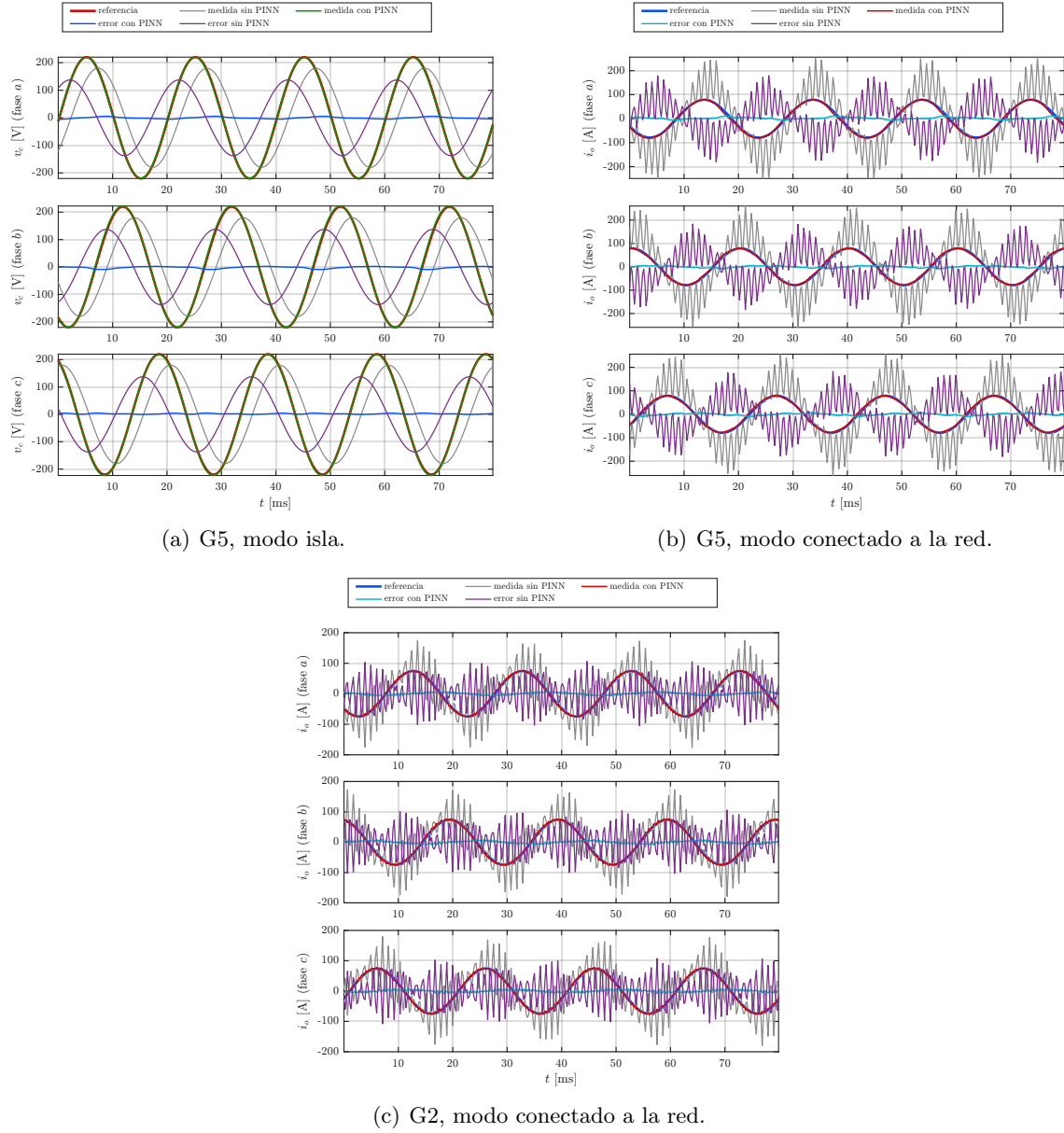


Figura B.5. Escenario 2, formas de onda de máxima mejora de los grupos G5 y G2. La del grupo G4 se presenta en el cuerpo, Figura 5.28.

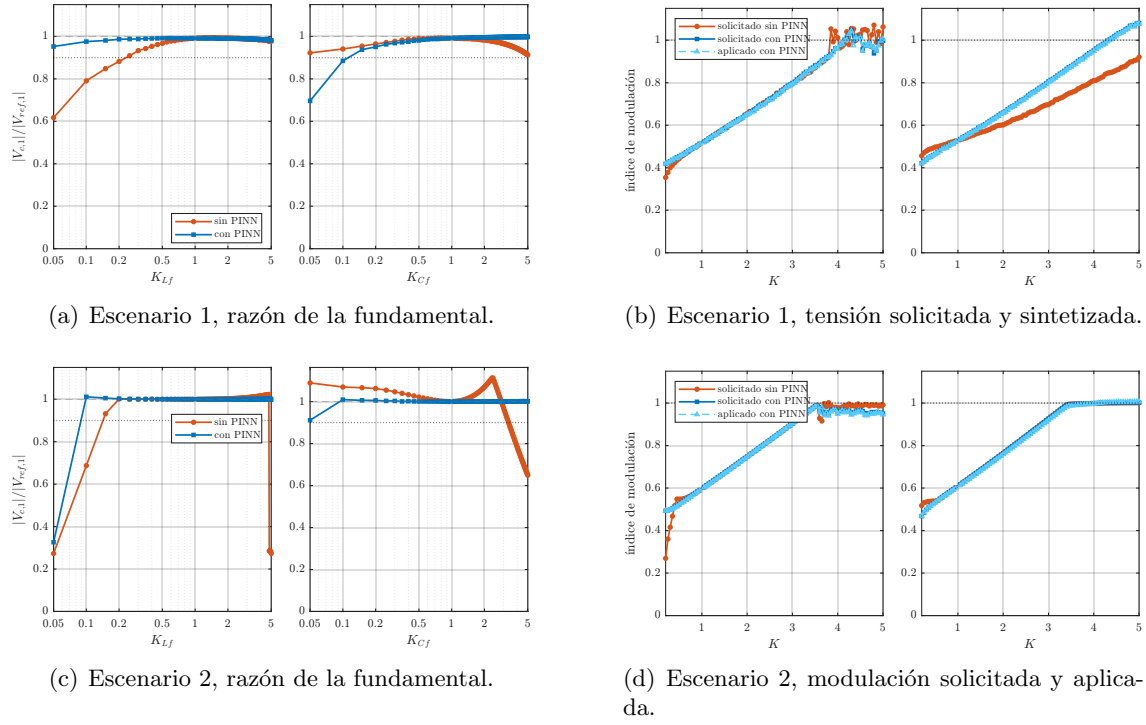


Figura B.6. Diagnósticos complementarios del límite de tensión en los dos escenarios.

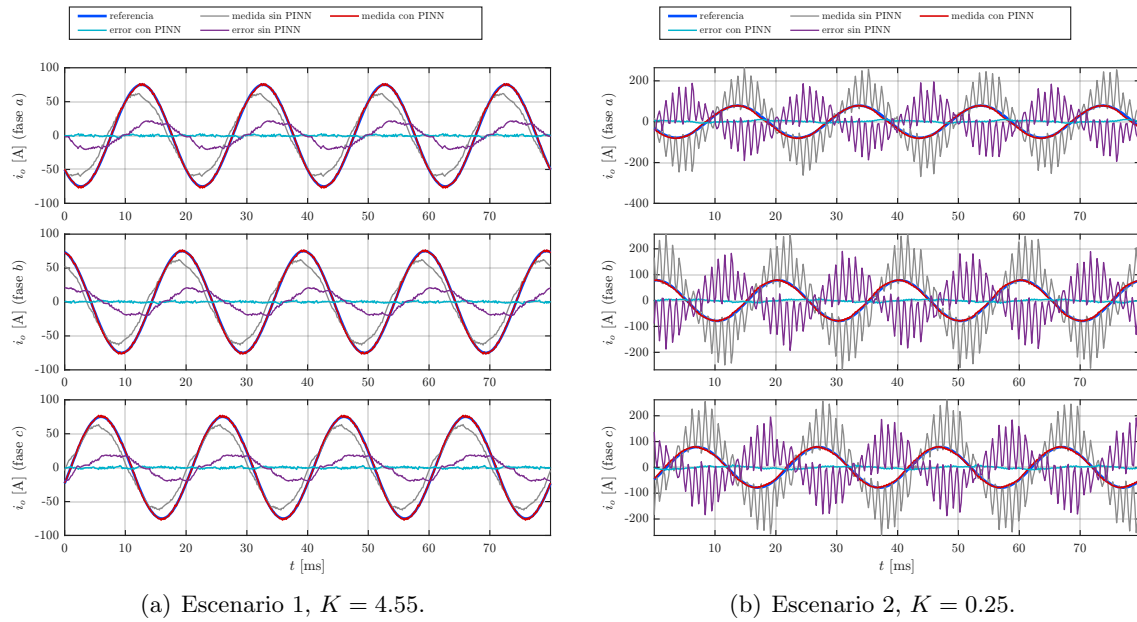
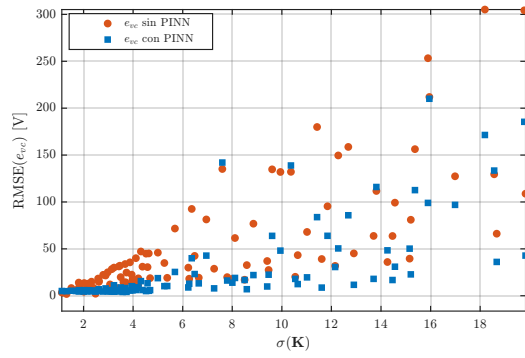
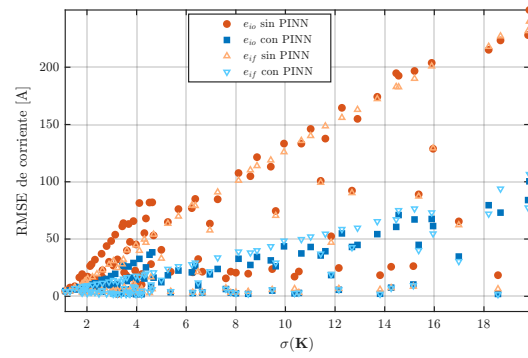


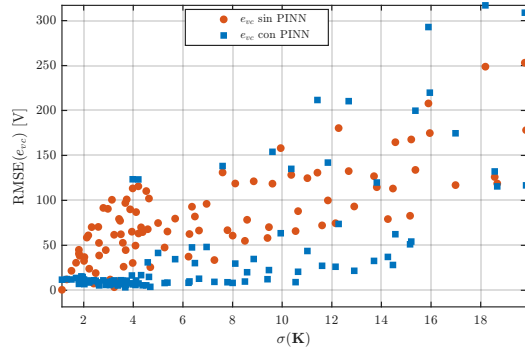
Figura B.7. Grupo $G4$, corriente de salida en modo conectado a la red.



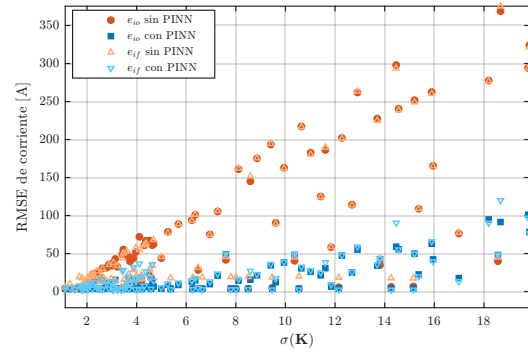
(a) Escenario 1, modo isla.



(b) Escenario 1, modo conectado a la red.

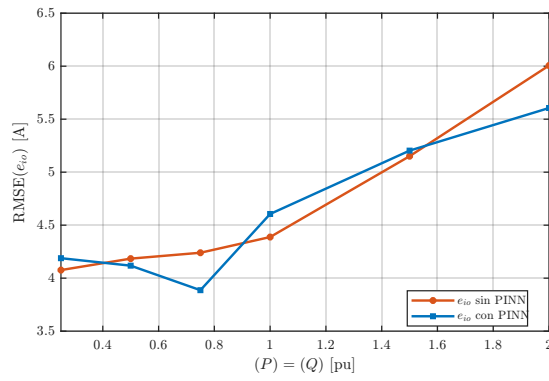


(c) Escenario 2, modo isla.

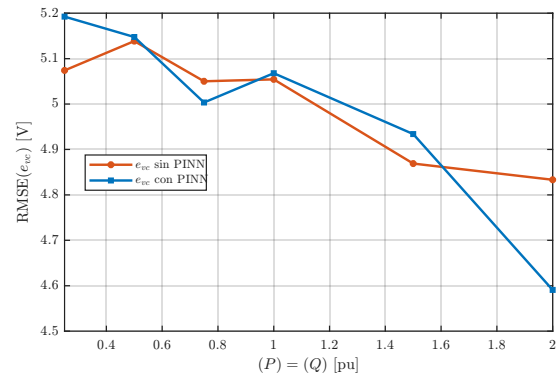


(d) Escenario 2, modo conectado a la red.

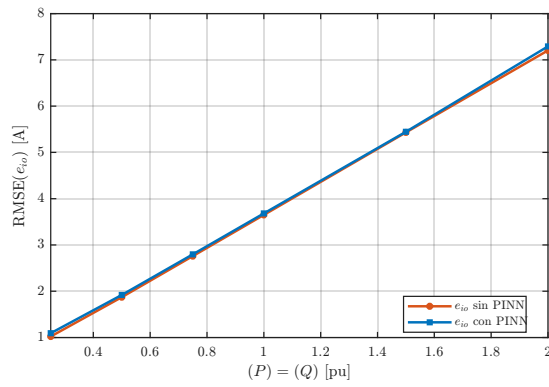
Figura B.8. Grupo G5, dispersión frente a la severidad $\sigma(K)$ en los dos escenarios.



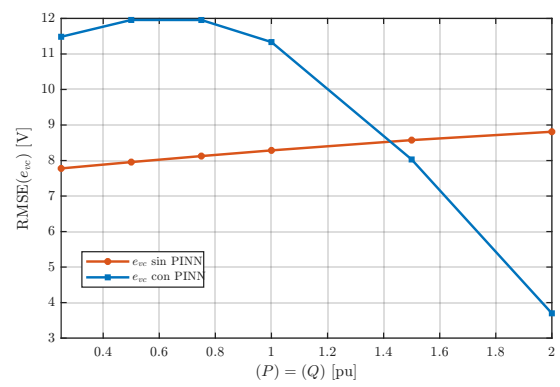
(a) Escenario 1, red.



(b) Escenario 1, isla.



(c) Escenario 2, red.



(d) Escenario 2, isla.

Figura B.9. Error por tramo en la condición nominal del ensayo de consignas, obtenido con la misma escalera de potencia aplicada en ambos modos de operación.

Bibliografía

- [1] J. Rocabert, A. Luna, F. Blaabjerg, and P. Rodríguez, “Control of power converters in ac microgrids,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 27, no. 11, pp. 4734–4749, 2012.
- [2] J. M. Guerrero, J. C. Vasquez, J. Matas, L. G. de Vicuña, and M. Castilla, “Hierarchical control of droop-controlled ac and dc microgrids, a general approach toward standardization,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 1, pp. 158–172, 2011.
- [3] F. Carnielutti, M. Aly, M. Norambuena, J. Hu, J. M. Guerrero, and J. Rodríguez, “A master–slave model predictive control approach for microgrids,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 40, no. 1, pp. 540–550, 2025.
- [4] P. Cortés, M. P. Kazmierkowski, R. M. Kennel, D. E. Quevedo, and J. Rodríguez, “Predictive control in power electronics and drives,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, no. 12, pp. 4312–4324, 2008.
- [5] J. Rodríguez and P. Cortés, *Predictive Control of Power Converters and Electrical Drives*. Wiley-IEEE Press, 2012.
- [6] S. Vazquez, J. Rodríguez, M. Rivera, L. G. Franquelo, and M. Norambuena, “Model predictive control for power converters and drives, advances and trends,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 2, pp. 935–947, 2017.
- [7] O. Babayomi and Z. Zhang, “Model-free predictive control of power converters with cascade-parallel extended state observers,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 70, no. 10, pp. 10 215–10 226, 2023.
- [8] T. Zhao, M. Zhang, C. Wang, and Q. Sun, “Model-free predictive current control of three-level grid-connected inverters with LCL filters based on kalman filter,” *IEEE Access*, vol. 11, pp. 21 631–21 640, 2023.
- [9] Z. Yin, F. Deng, A. Ghanem, S. S. Kaddah, and S. Abulanwar, “PLPR-based predictive control for LCL-filtered voltage source inverters,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 39, no. 6, pp. 7468–7480, 2024.
- [10] Z. Yin, F. Deng, S. S. Kaddah, and S. Abulanwar, “Modulated PLPR-based predictive control with noise suppression for LC-filtered voltage source inverters,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 72, no. 3, pp. 2588–2598, 2025.

- [11] M. Nauman and W. Shireen, “Efficient continuous control-set model-free predictive control of a grid-forming inverter with an LCL filter,” *IEEE Access*, vol. 13, pp. 157 235–157 248, 2025.
- [12] P. Burgos, H. Young, and P. Epul, “Model-free predictive voltage control of a grid-forming inverter based on an ultralocal predictor,” in *2023 IEEE CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON)*. Valdivia, Chile: IEEE, 2023, pp. 1–6.
- [13] S. Zhao, Y. Peng, Y. Zhang, and H. Wang, “Parameter estimation of power electronic converters with physics-informed machine learning,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 37, no. 10, pp. 11 567–11 578, 2022.
- [14] Y. Xiang, H. Lin, and H. S.-H. Chung, “Extended physics-informed neural networks for parameter identification of switched mode power converters with undetermined topological durations,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 40, no. 1, pp. 2235–2247, 2025.
- [15] M. Zhang, Q. Xu, and X. Wang, “Physics-informed neural network based online impedance identification of voltage source converters,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 70, no. 4, pp. 3717–3728, 2023.
- [16] E. Al Mahdouri, S. Al-Abri, H. Yousef, I. Al-Naimi, and M. Shadoul, “Parameter estimation of LC filter in grid-connected inverters using physics-informed neural networks (PINNs),” in *2026 International Conference on Sustainable Engineering and Digital Innovation (ICSEDI)*. Muscat, Oman: IEEE, 2026, pp. 1–6.
- [17] B. Huang and J. Wang, “Applications of Physics-Informed Neural Networks in Power Systems – A Review,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 38, no. 1, pp. 572–588, Jan. 2023.
- [18] E. Al Mahdouri, S. Al-Abri, H. Yousef, I. Al-Naimi, and H. Obeid, “Physics-informed neural networks in grid-connected inverters: A review,” *Energies*, vol. 18, no. 20, p. 5441, 2025.
- [19] G. S. Misyris, A. Venzke, and S. Chatzivasileiadis, “Physics-informed neural networks for power systems,” in *IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*, 2020.
- [20] J. Stiasny, G. S. Misyris, and S. Chatzivasileiadis, “Physics-informed neural networks for non-linear system identification for power system dynamics,” in *2021 IEEE Madrid PowerTech*. Madrid, Spain: IEEE, 2021, pp. 1–6.
- [21] P. Hui, C. Cui, P. Lin, C. Zhang, K. Xu, A. M. Y. M. Ghias, H. Chen, and X. Niu, “Physics-informed neural network model predictive control research on control strategy of DC-DC buck converter,” in *2024 9th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE)*. IEEE, 2024, pp. 2118–2122.
- [22] R. Feng, K. Wajid, M. Faheem, J. Wang, F. E. Subhan, and M. S. Bhutta, “Uniform physics informed neural network framework for microgrid and its application in voltage stability analysis,” *IEEE Access*, vol. 13, pp. 8110–8126, 2025.

- [23] S. Stock, D. Babazadeh, C. Becker, and S. Chatzivasileiadis, “Bayesian Physics-informed Neural Networks for system identification of inverter-dominated power systems,” *Electric Power Systems Research*, vol. 235, p. 110860, 2024.
- [24] L. Wang, S. Zhang, Y. Zhou, C. Fan, P. Zhang, and Y. A. Shamash, “Physics-informed, safety and stability certified neural control for uncertain networked microgrids,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 15, no. 1, pp. 1184–1187, Jan. 2024.
- [25] R. Teodorescu, M. Liserre, and P. Rodríguez, *Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems*. Chichester, UK: John Wiley & Sons–IEEE Press, 2011.
- [26] D. Xiao, K. S. Alam, M. Norambuena, M. F. Rahman, and J. Rodriguez, “Modified modulated model predictive control strategy for a grid-connected converter,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 68, no. 1, pp. 575–585, 2021.
- [27] R. E. Kalman, “A new approach to linear filtering and prediction problems,” *Journal of Basic Engineering*, vol. 82, no. 1, pp. 35–45, 1960.
- [28] V. S. Gonçalves, M. Aly, M. Norambuena, F. Bahamonde, F. Ruiz, H. Pinheiro, J. Rodriguez, and F. Carnielutti, “Model-free predictive control of grid-forming converters in parallel using arx-rls identification,” in *2025 17th Seminar on Power Electronics and Control (SEPOC)*, 2025.
- [29] M. A. Nielsen, *Neural Networks and Deep Learning*. Determination Press, 2015, disponible en <http://neuralnetworksanddeeplearning.com>.
- [30] K. Hornik, M. Stinchcombe, and H. White, “Multilayer feedforward networks are universal approximators,” *Neural Networks*, vol. 2, no. 5, pp. 359–366, 1989.
- [31] M. Raissi, P. Perdikaris, and G. E. Karniadakis, “Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations,” *Journal of Computational Physics*, vol. 378, pp. 686–707, 2019.
- [32] G. E. Karniadakis, I. G. Kevrekidis, L. Lu, P. Perdikaris, S. Wang, and L. Yang, “Physics-informed machine learning,” *Nature Reviews Physics*, vol. 3, pp. 422–440, 2021.
- [33] J. Kong, D. Zhou, X. Wei, and H. Wang, “A physics-informed neural network method for lc parameter estimation in three-phase inverter,” in *2024 IEEE 10th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC2024-ECCE Asia)*, 2024.
- [34] J. Nicodemus, J. Kneifl, J. Fehr, and B. Unger, “Physics-informed neural networks-based model predictive control for multi-link manipulators,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 55, no. 20, pp. 331–336, 2022.
- [35] E. A. Antonelo, E. Camponogara, L. O. Seman, J. P. Jordanou, E. R. de Souza, and J. F. Hübner, “Physics-informed neural nets for control of dynamical systems,” *Neurocomputing*, vol. 579, p. 127419, 2024.

- [36] M. Aly, F. Carnielutti, M. Abu-Zaher, A. Hassan, M. Norambuena, A. Shawky, and J. Rodriguez, “An efficient model predictive control design method for grid-connected distributed generation inverters with LCL filter,” in *IECON 2025 – 51st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2025.
- [37] W. G. Hurley and W. H. Wölflé, *Transformers and Inductors for Power Electronics: Theory, Design and Applications*, 1st ed. Chichester, UK: John Wiley & Sons, 2013.
- [38] H. Wang and F. Blaabjerg, “Reliability of capacitors for DC-link applications in power electronic converters—an overview,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 50, no. 5, pp. 3569–3578, 2014.
- [39] H. Wang, M. Liserre, and F. Blaabjerg, “Toward reliable power electronics: Challenges, design tools, and opportunities,” *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 7, no. 2, pp. 17–26, 2013.
- [40] L. Tarisciotti, P. Zanchetta, A. Watson, J. C. Clare, M. Degano, and S. Bifaretti, “Modulated model predictive control for a three-phase active rectifier,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 51, no. 2, pp. 1610–1620, 2015.
- [41] P. Karamanakos, E. Liegmann, T. Geyer, and R. Kennel, “Model predictive control of power electronic systems: Methods, results, and challenges,” *IEEE Open Journal of Industry Applications*, vol. 1, pp. 95–114, 2020.
- [42] F. Wang, S. Li, X. Mei, W. Xie, J. Rodríguez, and R. M. Kennel, “Model-based predictive direct control strategies for electrical drives: An experimental evaluation of PTC and PCC methods,” *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 11, no. 3, pp. 671–681, 2015.
- [43] S. Boyd and L. Vandenberghe, *Convex Optimization*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2004.
- [44] P. Cortés, J. Rodríguez, C. Silva, and A. Flores, “Delay compensation in model predictive current control of a three-phase inverter,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 59, no. 2, pp. 1323–1325, 2012.
- [45] J. Dannehl, F. W. Fuchs, S. Hansen, and P. B. Thøgersen, “Investigation of active damping approaches for PI-based current control of grid-connected pulse width modulation converters with LCL filters,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 46, no. 4, pp. 1509–1517, 2010.
- [46] B. A. Francis and W. M. Wonham, “The internal model principle of control theory,” *Automatica*, vol. 12, no. 5, pp. 457–465, 1976.
- [47] M. Berardi, F. V. Difonzo, and M. Icardi, “Inverse physics-informed neural networks for transport models in porous materials,” *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 435, p. 117628, 2025.
- [48] K. J. Åström and B. Wittenmark, *Computer-Controlled Systems: Theory and Design*, 3rd ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1997.

- [49] S. Ou, S. Sahoo, A. Sangwongwanich, F. Blaabjerg, M. Hassanifar, M. Votava, M. Langwasser, and M. Liserre, “Physics-informed neural network for parameter identification: a buck converter case study,” in *2025 IEEE Energy Conversion Congress & Exposition Asia (ECCE-Asia)*. IEEE, 2025, pp. 1–6.
- [50] Z. Xiang, W. Peng, X. Liu, and W. Yao, “Self-adaptive loss balanced physics-informed neural networks,” *Neurocomputing*, vol. 496, pp. 11–34, 2022.
- [51] A. Kendall, Y. Gal, and R. Cipolla, “Multi-task learning using uncertainty to weigh losses for scene geometry and semantics,” in *IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2018, pp. 7482–7491.
- [52] A. F. Psaros, K. Kawaguchi, and G. E. Karniadakis, “Meta-learning PINN loss functions,” *Journal of Computational Physics*, vol. 458, p. 111121, 2022.
- [53] D. P. Kingma and J. Ba, “Adam: A method for stochastic optimization,” in *3rd International Conference on Learning Representations (ICLR)*, San Diego, CA, USA, 2015.
- [54] E. I. Jury, *Theory and Application of the z-Transform Method*. New York: John Wiley and Sons, 1964.
- [55] K. Ogata, *Discrete-Time Control Systems*, 2nd ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1995.