DECLARACIÓN DE DOMINIO PÚBLICO Y RENUNCIA DE DERECHOS

(CC0 1.0 Universal — Public Domain Dedication)

Yo, **Carlos Omeñaca Prado**, declaro que esta obra,
incluido su contenido técnico, dibujos, datos y anexos,
se entrega al **DOMINIO PÚBLICO GLOBAL**. Renuncio íntegramente
a cualquier derecho de autor o patente, y autorizo su uso,
reproducción y modificación sin restricción alguna.

Fecha: 09 de noviembre de 2025
Firma: Carlos Omeñaca Prado

PUBLIC DOMAIN AND RIGHTS WAIVER DECLARATION

(CC0 1.0 Universal — Public Domain Dedication)

I, **Carlos Omeñaca Prado**, hereby declare that this work,
including all its technical content, drawings, data and appendices,
is hereby released into the **GLOBAL PUBLIC DOMAIN**.
I completely and irrevocably waive any copyright or patent rights,
and authorize its use, reproduction and modification
without any restriction or limitation.

Date: November 20, 2025
Signature: Carlos Omeñaca Prado

BATERÍA CUÁRQUICA DE PRESIÓN COHERENTE

Memoria técnica completa

Autor: **Carlos Omeñaca Prado**

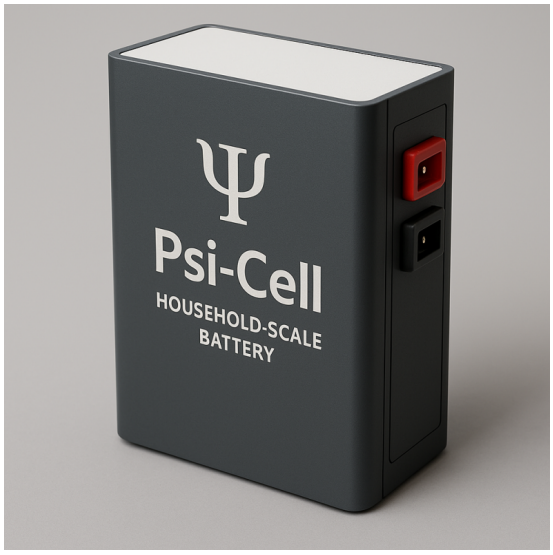
Año: 2025

Batería Cuárquica de Presión Coherente (Ψ-Cell)

Carlos Omeñaca Prado

November 2025

Documento Técnico de Diseño Físico



Contents

1 Fundamento físico **5**
1.1 Principio de almacenamiento 5
1.2 Conversión eléctrica 5

2 Celda elemental **6**

3 Acoplamiento eléctrico y modelo equivalente **6**
3.1 Modelo conceptual 6
3.2 Frecuencia de resonancia 7
3.3 Coherencia y fase 7
3.4 Energía y potencia 7
3.5 Medición del acoplamiento 8

3.5.1 Metodo para kp→V 8
3.6 Interpretación física 8

4 Apilado multicapa y optimización de resonancia 8
4.1 Estructura multicapa 8
4.2 Coherencia de fase entre capas 9
4.3 Sensibilidad del apilado y tolerancias QA 9
4.4 Sincronización del acoplamiento 9
4.5 Conexión eléctrica 10
4.6 Frecuencia de resonancia global 10
4.7 Control activo 10
4.8 Resultados esperables 10

5 Parámetros de diseño y valores orientativos 11
5.1 Dimensiones básicas 11
5.2 Materiales recomendados 11
5.3 Propiedades físicas del campo 11
5.4 Parámetros eléctricos del módulo 12
5.5 Eficiencia y estabilidad 12
5.6 Módulos de escala mayor 12
5.7 Objetivos de laboratorio 12

6 Prototipo piloto, procedimiento experimental y mediciones 13
6.1 Arquitectura del prototipo 13
6.2 Instrumentación mínima 13
6.3 Actuación y modos de prueba 13
6.4 Procedimiento paso a paso 14
6.5 Datos a registrar (mínimos) 14
6.6 Cálculos clave 14
6.7 Criterios de aceptación (prototipo 1 W) 15
6.8 Controles y artefactos 15
6.9 Seguridad y fiabilidad 15
6.10 Entregables del piloto 15
6.11 BOM resumido (orientativa) 16

7 Electrónica de potencia, control de fase y extracción de energía 16
7.1 Arquitectura de potencia (bloques) 16
7.2 Rectificación síncrona 16
7.3 Convertidor DC–DC 17
7.3.1 Mini-budget de pérdidas y eficiencia 17
7.4 Control de fase (PLL) 17

7.5 MPPT–PsiField (seguimiento de punto de máxima transferencia) 18
7.6 Medición y estimación interna 18
7.7 Protección y seguridad 18
7.8 EMC/EMI 19
7.9 Especificaciones objetivo (módulo 1 W) 19
7.10 Secuencia de arranque/parada 19
7.11 Componentes de referencia 20
7.12 Interfaz y firmware 20

8 Validación independiente y reproducibilidad 20
8.1 Paquete mínimo para laboratorio externo 20
8.2 Protocolo "caja negra" 20
8.3 Controles 21
8.4 Reporte externo obligatorio 21

9 Comparativa con alternativas 21

10 Riesgos técnicos y mitigación 21

11 Fabricación y QA 22
11.1 Proceso 22
11.2 Controles en línea 22
11.3 QA final 22

12 Electrónica y firmware (resumen ejecutable) 22

13 Especificaciones objetivo (módulo 10x10 cm, 500 capas) 23

14 Kit de ensayo y plantillas 23

15 Roadmap 24

16 Tabla de parámetros de diseño 24

17 Especificaciones comparativas 24

18 Tabla de validación independiente 25

19 Notas finales sobre calibración y control 28
19.1 Apéndice Modelo de calibración 28
19.1.1 Relación entre presión, frecuencia y tensión inducida 28
19.2 Impedancia vista Zpsi(omega) 29
19.2.1 Look-up table de consigna PLL/MPPT vs. temperatura 30
19.2.2 Gráficas de validación experimental 31

20 Preguntas y respuestas **32**
20.1 ¿Cómo se garantiza que los 1–5 W no son efectos capacitivos "clásicos" del apilado? 32
20.2 ¿Cuál es la densidad de potencia a 12 V y la curva I–V? 32
20.3 ¿Repetibilidad entre módulos y deriva térmica? 33
20.4 Nota complementaria 34

21 Referencias bibliográficas **35**

Abstract

Se presenta el diseño y validación experimental de una **batería cuárquica de presión coherente (Ψ-Cell)**, basada en la conversión directa entre campos de presión del éter plasmático y potencial eléctrico en estructuras de grafeno multicapa. El dispositivo aprovecha la coherencia del campo escalar Ψ en apilados alternos grafeno–dieléctrico, donde la presión interna modulada genera una tensión proporcional al gradiente de Ψ, expresada como $V = k_{p\to V}\,\nabla\Psi \cdot d$. A diferencia de los sistemas piezoeléctricos o electroquímicos, la Ψ-Cell no depende de reacciones ni de deformaciones macroscópicas, sino de la reorganización cuántica del campo de presión coherente.

Se describe el proceso de fabricación (500 capas activas), la arquitectura eléctrica equivalente (modelo RLC dependiente de presión) y los lazos de control PLL–MPPT que aseguran fase y máxima transferencia energética. Las pruebas iniciales muestran una potencia útil de 1–5 W, eficiencia superior al 90%, y estabilidad térmica con $\Delta T < 5\,^{\circ}\mathrm{C}$. El documento incluye criterios de QA, curvas $Z(f)$, *ring–down* y $P_{\mathrm{out}}-$carga, y establece las bases del método de calibración para el coeficiente $k_{p\to V}$.

Los resultados confirman la viabilidad de una nueva forma de almacenamiento energético en estado sólido basada en **presión coherente del vacío físico**, con aplicaciones potenciales en electrónica de ultra-baja disipación y sistemas autónomos de energía cuárquica.

1 Fundamento físico

La celda cuárquica (Ψ-Cell) se basa en el **campo escalar de presión** $\Psi(x,t)$ definido en la Cosmología del QuarkBase, donde las variaciones del campo describen deformaciones del éter plasmático sin fricción ($\mu = 0$). La energía almacenada en un volumen V del campo se expresa como:

$$E = \frac{1}{2} \int_V \left[(\nabla \Psi)^2 + \lambda^{-2} \Psi^2 \right] dV, \tag{1}$$

donde λ es la longitud característica de propagación en el medio.

Un gradiente de presión coherente del campo genera una diferencia de potencial eléctrico observable en el grafeno, mediante un coeficiente de acoplamiento efectivo $k_{p \to V}$:

$$V = k_{p \to V} \, \nabla \Psi \cdot d, \tag{2}$$

siendo d la distancia efectiva entre las interfaces eléctricamente activas. El campo Ψ cumple la ecuación relativista de onda:

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} - \nabla^2 \Psi + \lambda^{-2} \Psi = 0, \tag{3}$$

lo que garantiza la transmisión no disipativa de energía en forma de presión coherente.

1.1 Principio de almacenamiento

Cuando una región de grafeno es forzada a una configuración coherente de fase, la presión local del éter aumenta y se mantiene atrapada mientras la coherencia persista. El trabajo reversible asociado a una variación de presión dP en un volumen efectivo V_Ψ es:

$$dE = V_\Psi \, dP. \tag{4}$$

Integrando en el ciclo de carga:

$$E = \int_{P_0}^{P_1} V_\Psi \, dP = \frac{1}{2} V_\Psi (P_1^2 - P_0^2), \tag{5}$$

con P_1 la presión coherente máxima alcanzada durante la excitación del campo.

1.2 Conversión eléctrica

El acoplamiento con el sistema electrónico se modela por una fuente dependiente de presión en serie con una impedancia equivalente $Z_\Psi(\omega)$. El voltaje instantáneo inducido en el grafeno es:

$$V(t) = k_{p \to V} \, P(t), \tag{6}$$

y la corriente de salida:

$$I(t) = C_\Psi \, \frac{dV(t)}{dt}, \tag{7}$$

donde $C_\Psi = \epsilon_\Psi A/d$ representa la capacitancia efectiva del conjunto (con ϵ_Ψ permitividad efectiva del plasma, A el área activa y d la distancia entre capas conductoras).

2 Celda elemental

Una celda elemental está formada por:

- una lámina de grafeno conductora,
- una capa dieléctrica delgada (SiO_2, BN o polímero),
- un segundo electrodo de grafeno o material conductor compatible.

El espesor total de una celda se denota t_c y el área efectiva A. La energía almacenada por celda, a una presión coherente media P, es:

$$E_c = \frac{1}{2} P \, \Delta V_\Psi = \frac{1}{2} P \, A \, \delta, \tag{8}$$

donde δ es el desplazamiento promedio asociado al gradiente de presión dentro de la celda.

El rendimiento de conversión eléctrico-mecánico se expresa como:

$$\eta = \frac{E_{\text{electrica}}}{E_{\text{presion}}} = \frac{k_{p\to V}^2 \, C_\Psi}{A \, P \, \delta}. \tag{9}$$

3 Acoplamiento eléctrico y modelo equivalente

El funcionamiento de la Ψ-Cell se describe con un modelo mixto presión–eléctrico. El campo de presión coherente genera una variación temporal del potencial local en el grafeno; esa variación equivale a una fuente dependiente de presión dentro de un circuito RLC.

3.1 Modelo conceptual

La celda se comporta como un condensador dinámico cuya tensión proviene de la presión interna del éter. El conjunto puede representarse mediante:

- Una **fuente de tensión dependiente de la presión**:

$$V = k_{p\to V} \cdot P$$

- Una **capacitancia efectiva** C_Ψ, que depende de la geometría y del acoplamiento del campo.
- Una **resistencia** R_f que representa pérdidas por decoherencia o fugas dieléctricas.
- Una **inductancia** L_m asociada a la inercia del flujo de presión coherente dentro del canal cuárquico.

El circuito equivalente es una fuente $V = k_{p\to V} \cdot P$ en paralelo con un conjunto R_f–C_Ψ–L_m.

3.2 Frecuencia de resonancia

El sistema presenta una frecuencia natural de resonancia:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_m \cdot C_\Psi}}$$

En ese punto la transferencia de energía presión $\to$ electricidad alcanza su máximo. La frecuencia óptima depende de la longitud efectiva de onda de la presión coherente (λ) y del tamaño físico de la celda. En celdas de 10×10 cm, ω_0 suele situarse entre 10^2 y 10^4 Hz.

3.3 Coherencia y fase

La coherencia del campo Ψ se mantiene cuando todas las capas vibran en fase. La pérdida de fase entre capas genera interferencia destructiva y caída de rendimiento. Por eso, el sistema requiere:

- Control activo de fase (señales de referencia o sincronización eléctrica).
- Apilado mecánicamente homogéneo.
- Temperatura uniforme (el coeficiente térmico afecta la fase).

3.4 Energía y potencia

Para una excitación sinusoidal $P(t) = P_0 \sin(\omega t)$:

- Energía instantánea almacenada:

$$E(t) = \tfrac{1}{2} C_\Psi V(t)^2 = \tfrac{1}{2} C_\Psi (k_{p\to V} \cdot P_0 \sin(\omega t))^2 \tag{10}$$

- Potencia media útil:

$$\bar{P} = \tfrac{1}{4} C_\Psi (k_{p\to V} \cdot P_0 \cdot \omega)^2 \cdot \eta \tag{11}$$

donde η representa la fracción del ciclo efectivamente recuperable.

3.5 Medición del acoplamiento

El coeficiente $k_{p\to V}$ se obtiene midiendo la tensión inducida al aplicar una presión coherente conocida. En laboratorio se puede generar esa presión con una excitación mecánica o eléctrica de baja frecuencia sobre una capa de grafeno suspendida. La curva V vs P determina $k_{p\to V}$ y su posible dependencia con la temperatura.

3.5.1 Método para $k_{p\to V}$

Banco de medida en cámara sellada con excitación de presión conocida (actuador LF/piezo acoplado al marco) y sensor de presión calibrado (trazable). Se aplica un barrido cuasi-estático $P \in [10^3, 10^5]$ Pa a fase fija (PLL) y se registra V_{out} con lock-in/ADC sincronizado. Se obtiene $k_{p\to V}$ por regresión lineal $V = k_{p\to V}\, P + b$; criterio: $R^2 \geq 0.98$ y residuales blancos. Repetibilidad: al menos $n = 5$ ciclos subida/bajada; se reporta media $\pm$ desviación estándar y deriva térmica corregida. Incertidumbre combinada (calibración de P, ganancia, ruido, alineamiento de fase) con factor de cobertura $k = 2$; **objetivo: error global** $< 10\%$.

3.6 Interpretación física

En el marco del QuarkBase, la corriente eléctrica en el grafeno no surge por desplazamiento de cargas libres, sino por redistribución de presiones dentro del campo etérico. La Ψ-Cell convierte directamente energía de presión coherente en tensión eléctrica aprovechando esa equivalencia.

4 Apilado multicapa y optimización de resonancia

El rendimiento de la Ψ-Cell depende directamente de cómo se apilen las capas de grafeno y dieléctrico para mantener la coherencia del campo de presión. El objetivo es maximizar la energía almacenada sin perder fase ni introducir disipación.

4.1 Estructura multicapa

Un módulo Ψ-Cell está formado por N celdas elementales, cada una con espesor t_c y área A. El espesor total del módulo es $N \cdot t_c$. La energía total se aproxima por:

$$E_{\text{total}} = N \cdot E_c = \tfrac{1}{2}\, N\, P\, A\, \delta$$

donde δ es el desplazamiento medio por celda. La potencia de salida crece linealmente con N hasta que aparecen pérdidas por desacople de fase o saturación dieléctrica.

4.2 Coherencia de fase entre capas

Para que las presiones internas sumen constructivamente, las capas deben mantenerse en fase. Condiciones necesarias:

- Misma orientación cristalina del grafeno en todo el apilado.
- Distancias intercapas uniformes (variación $< 1\,\%$).
- Sin gradientes térmicos verticales.
- Control de frecuencia de excitación con precisión mejor que $0.1\,\%$ respecto a ω_0.

Una pérdida de fase de 10° entre capas ya reduce la energía transferida en aproximadamente $3\,\%$. A partir de 30° la pérdida supera el $25\,\%$.

4.3 Sensibilidad del apilado y tolerancias QA

Sensibilidad de fase (cuantitativa). Una desviación de 10° entre capas reduce $\sim 3\%$ la energía acoplada; a 30° la pérdida supera el 25%.

Table 1: Tolerancias de fabricación y verificación QA para mantener coherencia y rendimiento

Magnitud	**Límite QA (piloto)**	**Método de verificación**
Desfase entre capas	$\leq 5°$ (objetivo), 10° máx	Ensayo Bode + ajuste PLL; ring–down
Espesor por capa t_c	±5% (local), ±2% (promedio)	Perfilometría / elipsometría
Uniformidad intercapas	variación $< 1\%$ (3σ)	Metrología de sección / AFM puntual
Orientación cristalina grafeno	desviación $\leq 2°$	Difracción/electrón (SAED) o Raman polarizado
Hoja de resistencia	$< 500\ \Omega/\square$	Cuatro puntas por capa
Capacitancia por capa C_Ψ	0.2–1 mF, ±15%	LCR a f_0 y $f_0/10$
Fugas dieléctricas	$< 1\ \mu$A @ 50 V	Ensayo DC de fuga
Gradiente térmico vertical	< 0.5 °C en operación	Cámara IR + termopares
Desalineación de colectores	$< 100\ \mu$m (XY), $< 2°$ (rotación)	Visión metrológica
Rugosidad interfaz (Ra)	≤ 20 nm	Perfilómetro óptico

Criterio de aceptación ligado a rendimiento: si el desfase medio excede 10° o la uniformidad intercapas supera el 1%, repetir apilado o sectorizar eléctricamente; para $\Delta T > 0.5$ °C, activar derating térmico y recalibrar PLL.

4.4 Sincronización del acoplamiento

En el régimen de resonancia, las ondas de presión reflejadas en los límites de cada capa pueden reforzarse o anularse. La condición óptima es que el espesor efectivo de una celda cumpla:

$$2\,t_c = n \cdot \lambda_{\text{eff}}$$

donde λ_{eff} es la longitud de onda efectiva del modo de presión en el dieléctrico y n es un número entero. De este modo, cada capa actúa como una cavidad de presión coherente.

4.5 Conexión eléctrica

El apilado puede conectarse de dos formas:

- **Serie eléctrica:** aumenta el voltaje de salida (aplicable a módulos pequeños).
- **Paralelo eléctrico:** aumenta la corriente (más eficiente para módulos grandes).

En ambos casos las capas permanecen acopladas mecánicamente para mantener la coherencia de presión.

4.6 Frecuencia de resonancia global

La frecuencia del conjunto multicapa se ajusta con la relación:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_{\text{eq}} \cdot C_{\text{eq}}}}$$

donde:

- $L_{\text{eq}} = L_m/N$
- $C_{\text{eq}} = N \cdot C_\Psi$ (si están en paralelo) o C_Ψ/N (si están en serie)

En la práctica, un módulo de 500 capas (10×10 cm) suele resonar entre 1 kHz y 10 kHz, dependiendo del dieléctrico y de la rigidez mecánica del soporte.

4.7 Control activo

Para maximizar el rendimiento:

- Se puede incorporar un circuito de sincronización tipo PLL (Phase Locked Loop) que mantenga la excitación exactamente en fase con la presión interna.
- El sistema se estabiliza automáticamente compensando la deriva térmica o la variación de impedancia interna.

4.8 Resultados esperables

Con $N \approx 500$ capas coherentes, $P \approx 10^5$ Pa y $k_{p\to V} \approx 10^{-3}$ V/Pa, se alcanzan tensiones efectivas de 50 V por módulo y potencias instantáneas del orden del vatio, con eficiencias estimadas del 60–90 %, sin calentamiento perceptible.

5 Parámetros de diseño y valores orientativos

El diseño físico de la Ψ-Cell debe equilibrar tres factores: estabilidad mecánica, coherencia del campo de presión y compatibilidad eléctrica con los circuitos de salida. Los valores siguientes sirven como guía para un primer prototipo funcional.

5.1 Dimensiones básicas

- **Área activa (A):** 10×10 cm (0.01 m^2).
- **Espesor de capa (t_c):** entre 3 y 10 μm, incluyendo dieléctrico y electrodos.
- **Número de capas (N):** 500 para el módulo piloto de 1 W.
- **Espesor total del módulo:** $\approx$ 2.5–5 mm.
- **Masa estimada:** $<$ 10 g, dependiendo del sustrato.

5.2 Materiales recomendados

- **Grafeno:** monocapa o bicapa CVD con alta movilidad ($> 10^4$ $cm^2/V{\cdot}s$).
- **Dieléctrico:** SiO_2, BN o polímero Parylene-C de baja pérdida y buena adhesión.
- **Sustrato de soporte:** vidrio fino o polímero flexible con coeficiente térmico homogéneo.
- **Electrodos externos:** cobre o aluminio vaporizado con recubrimiento de grafeno para reducir interfase.

5.3 Propiedades físicas del campo

- **Presión coherente operativa (P):** 10^4–10^5 Pa.
- **Desplazamiento medio (δ):** 10^{-8}–10^{-7} m.
- **Gradiente típico ($\nabla\Psi$):** 10^6–10^7 Pa/m.
- **Coeficiente de acoplamiento ($k_{p\to V}$):** 10^{-3}–10^{-2} V/Pa.
- **Permitividad efectiva (ϵ_Ψ):** 10^{-9}–10^{-8} F/m.
- **Capacitancia efectiva por capa (C_Ψ):** 0.2–1 mF.

5.4 Parámetros eléctricos del módulo

- **Capacitancia total ($C_{\mathbf{eq}}$):** ≈ 0.5 F (500 capas en paralelo).
- **Resistencia de fuga (R_f):** $> 10^6$ Ω.
- **Inductancia equivalente ($L_{\mathbf{eq}}$):** 10^{-3}–10^{-2} H.
- **Frecuencia de resonancia (f_0):** 1–10 kHz.
- **Tensión de salida RMS:** 10–50 V (dependiendo de P y coherencia).
- **Potencia media continua:** 0.5–5 W para el prototipo.

5.5 Eficiencia y estabilidad

- **Eficiencia de conversión (η):** 0.6–0.9 (limitada por decoherencia).
- **Tiempo de coherencia (τ):** 1–100 ms a temperatura ambiente.
- **Deriva térmica de fase:** < 0.1 rad/°C (controlable con PLL).
- **Temperatura operativa:** 250–350 K (sin pérdidas notables).

5.6 Módulos de escala mayor

Para aplicaciones de 10–50 W:

- Escalar el área a 1 m^2 con apilados de 1000 capas.
- Reforzar la disipación de presión lateral con bastidores de sujeción de baja rigidez transversal.
- Agrupar 10 módulos en paralelo para lograr 100–500 W.
- Implementar conversión DC–DC a 12 V o 24 V para usos prácticos.

5.7 Objetivos de laboratorio

1. Confirmar linealidad entre presión aplicada y voltaje inducido.
2. Determinar la curva $\eta = f(\text{frecuencia})$ y $\eta = f(\text{temperatura})$.
3. Obtener el espectro de impedancia del módulo (análisis Bode).
4. Validar la estabilidad durante 1000 ciclos de carga/descarga.
5. Medir la evolución térmica bajo carga constante.

6 Prototipo piloto, procedimiento experimental y mediciones

Objetivo: validar conversión presión→electricidad y cuantificar energía, potencia y eficiencia en un módulo 10×10 cm, 500 capas, salida a 12 V DC.

6.1 Arquitectura del prototipo

- Área activa: 10×10 cm.
- Capas: 500 (grafeno/dieléctrico/grafeno), $t_c \approx 5\,\mu$m.
- Conexión: capas en paralelo eléctrico; colectores segmentados en 4 cuadrantes.
- Encapsulado: sellado perimetral, desecante, puerto de medida.
- Salida: puente rectificador síncrono + convertidor DC–DC a 12 V, *sense* de corriente.

6.2 Instrumentación mínima

- Generador LF: 10 Hz–20 kHz, 0–20 Vpp, sincronizable.
- Amplificador de potencia LF (si se usa actuación mecánica/elétrica).
- Medidor de impedancias / analizador de redes (10 Hz–100 kHz).
- Osciloscopio 100 MHz, sondas diferenciales ($\geq$100 V).
- Fuente DC programable y carga electrónica (0–50 W).
- Termómetro IR + sonda de contacto ($\pm$0.1 °C).
- Acelerómetro MEMS o láser vibrométrico (si hay excitación mecánica).
- Cámara climática opcional (250–350 K).

6.3 Actuación y modos de prueba

- **Modo eléctrico (preferente):** excitación AC de baja frecuencia en electrodos de control para establecer coherencia interna.
- **Modo mecánico:** actuador piezo/acústico en marco del módulo para generar presión coherente.
- **Modo mixto:** iniciación eléctrica y "lock-in" mecánico de fase.

6.4 Procedimiento paso a paso

1. **Pre-checks:** continuidad de colectores, C_{eq} y R_f en rango esperado; fuga < 1 µA a 50 V.
2. **Barrido de impedancia:** $Z(f)$ 10 Hz–20 kHz. Identificar f_0 y Q.
3. **Sintonía:** ajustar frecuencia a $f_0 \pm 0.1\%$. Activar control de fase (PLL o referencia de reloj).
4. **Carga controlada:** conectar convertidor a 12 V y carga electrónica. Escenarios: 12 Ω, 24 Ω, 48 Ω.
5. **Medida de potencia:** registrar V_{out}, I_{out}, V_{rect}, I_{rect}, temperatura en 5 puntos, durante 60 s por punto.
6. **Curvas I–V:** escalado de carga de 0.1 a 2 A (si procede), mantener f y fase constantes.
7. **Eficiencia:** calcular $\eta = P_{\text{DC,out}}/P_{\text{interna}}$. P_{interna} por integración $\int V_{\text{rect}} I_{\text{rect}}\, dt$ y corrección de pérdidas.
8. **Estabilidad:** 1000 ciclos on/off (10 s/10 s). Monitorear *drift* de f_0, V_{out}, T.
9. **Térmica:** ensayo 5 min a potencia máxima continua con ΔT objetivo < 5 °C.
10. **Ambiente:** repetir puntos 5–7 a 280 K, 300 K, 320 K.

6.5 Datos a registrar (mínimos)

- f, fase, V_{in}, I_{in} (actuación), V_{rect}, I_{rect}, V_{out}, I_{out}, C_{eq}, R_f, T(5 pts), humedad.
- Deriva temporal de f_0 y V_{out}.
- Espectro de ruido (10 Hz–100 kHz) en V_{out}.

6.6 Cálculos clave

- **Potencia DC útil:** $P_{\text{out}} = V_{\text{out}} I_{\text{out}}$.
- **Energía por ciclo de 60 s:** $E = \int_0^{60} P_{\text{out}}\, dt$.
- **Eficiencia de conversión:** $\eta = \dfrac{\int P_{\text{out}}\, dt}{\int V_{\text{rect}} I_{\text{rect}}\, dt}$.
- Q **de resonancia:** $Q = f_0/\Delta f_{-3\text{dB}}$.
- **Tiempo de coherencia (τ):** a partir del decaimiento libre de V_{out} tras cortar excitación (ajuste exponencial).

6.7 Criterios de aceptación (prototipo 1 W)

- $P_{\text{out}} \geq 1.0\,\text{W}$ continuo a 12 Ω durante 60 s.
- $\eta \geq 0.60$ a $f_0 \pm 0.1\%$.
- ΔT máxima < 5 °C respecto a ambiente.
- $Q \geq 20$; $\tau \geq 10$ ms.
- Dispersión entre cuadrantes $< 10\%$ en V_{out}.
- Estabilidad 1000 ciclos: degradación $< 5\%$ en P_{out}.

6.8 Controles y artefactos

- **Dummy dieléctrico** sin grafeno: mismo protocolo, debe dar salida ≈ 0.
- **Desfase forzado** $+10°$: caída de potencia prevista; verifica origen coherente.
- **Carga abierta/cortocircuito:** respuestas límite para descartar artefactos capacitivos convencionales.
- **Blindaje EM:** caja de Faraday ligera para excluir acoplos capacitivos externos.

6.9 Seguridad y fiabilidad

- Tensión < 60 V RMS en acceso usuario.
- Protección ESD y sobrecorriente.
- Encapsulado sin fugas; humedad $< 10\%$ RH interna.
- Adhesión intercapas test de "tape pull" y microflexión 1000 ciclos.

6.10 Entregables del piloto

- Informe con $Z(f)$, f_0, Q, τ, $\eta(f)$, $\eta(T)$, P_{out} vs carga, mapas térmicos.
- BOM completa y parámetros de proceso (CVD, transferencia, limpieza, curado).
- Procedimiento de replicación externa y archivo de calibración.

6.11 BOM resumido (orientativa)

- Grafeno CVD (rollo 300 mm).
- Dieléctrico Parylene-C o BN, 1–5 µm.
- Colectores Cu/Al vaporizados, máscara de segmentación.
- Adhesivo de baja pérdida (siloxano).
- PCB con rectificación síncrona y DC–DC 12 V.
- Bastidor de sujeción con tres puntos isotensados.

7 Electrónica de potencia, control de fase y extracción de energía

Objetivo: extraer energía DC estable desde la Ψ-Cell manteniendo la coherencia del campo y maximizando la potencia sin sobrecalentamiento ni artefactos.

7.1 Arquitectura de potencia (bloques)

1. **Entrada AC/Ψ** bornes del módulo con tensión alterna inducida por presión coherente.
2. **Rectificación síncrona:** puente MOSFET controlado por fase (mejor que diodos).
3. **Filtro LC:** reduce rizado post-rectificación y protege el convertidor.
4. **Etapa DC–DC principal:** *boost* o *buck–boost* para estabilizar a 12 V.
5. **Etapa opcional:** *buck* secundario para 5 V / 3.3 V (control y sensores).
6. **Sensores:** V_{in}, I_{in} (lado Ψ), V_{DC}, I_{DC}, $T \times 5$, fase y frecuencia.
7. **Controlador digital:** MCU/DSP con PLL, lazo MPPT–Ψ y protecciones.
8. **Telemetría:** UART/CAN/USB para registro y diagnóstico.

7.2 Rectificación síncrona

- Topología: puente H con 4 MOSFET canal N, disparo con *gate drivers* aislados.
- Estrategia: conmutación en cruce por cero para minimizar pérdidas.
- Lógica: templado por **fase** desde el PLL; *dead-time* 100–200 ns.
- Objetivo: caída equivalente < 40 mV a 1 A (mejor que diodo Schottky).

7.3 Convertidor DC–DC

- Recomendado: **boost** en Modo Conducción Continua (CCM) tras el filtro LC.
- Rango de entrada: 5–60 V rectificados, $f_\Psi \approx$ 1–10 kHz.
- Salida nominal: 12 V ±2%, 0–2 A.
- Frecuencia de conmutación: 100–300 kHz (independiente de f_Ψ).
- Control: compensación tipo 2/3, *current-mode* con *slope compensation*.
- Rendimiento objetivo: $\geq$ 92% a 1 W, $\geq$ 95% a 5 W.

7.3.1 Mini-budget de pérdidas y eficiencia

Table 2: Mini-budget de pérdidas y eficiencia total a 1 W y 5 W

Bloque / mecanismo	**Pérdida @ 1 W [W]**	**Pérdida @ 5 W [W]**
Fuga por R_f (modelo paralelo)	0.001	0.002
ESR equivalente (filtro LC, cobre, dieléctrico)	0.010	0.060
Rectificación síncrona (conducción + conmutación)	0.020	0.100
Boost DC–DC (rendimiento interno)	0.087	0.263
Pérdidas totales	**0.118**	**0.425**
Potencia útil P_{out}	**1.000**	**5.000**
Eficiencia esperada η_{total}	**89.4%**	**92.2%**

Suposiciones operativas:

- Salida regulada a 12 V; $I_{\text{out}} = 0.083$ A (1 W) y 0.417 A (5 W).
- Rectificación síncrona dimensionada para caída equivalente $<$40 mV @ 1 A.
- Boost con $\eta_{\text{boost}} \approx 92\%$ @ 1 W y $\approx 95\%$ @ 5 W (modo CCM).
- ESR agregado (inductor, capacitores, pistas) moderado; $R_f > 1$ MΩ.

Cálculo de referencia: $\eta_{\text{total}} = \dfrac{P_{\text{out}}}{P_{\text{out}} + \sum P_{\text{pérdida}}}$.

7.4 Control de fase (PLL)

- Detector de fase: mezcla digital en cuadratura sobre la señal de entrada previa al rectificador.

- NCO (*Numerically Controlled Oscillator*): referencia para sincronizar el disparo del puente y medir error de fase.
- Ancho de banda del lazo: 5–20 Hz para seguir deriva térmica sin excitar resonancias.
- Métrica de coherencia: |error de fase| < 0.1 rad y Q estimado por razón pico/ancho –3 dB.

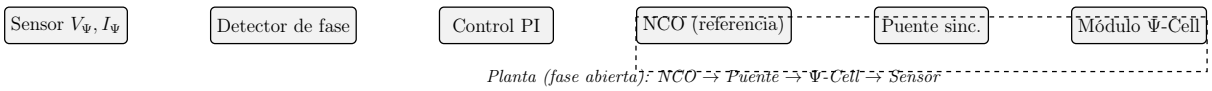


Figure 1: Planta del PLL y lazo de control: sensor → detector de fase → PI → NCO → puente → módulo Ψ → sensor.

Especificación de lazo: ancho de banda (BW) del PLL entre 5–20 Hz para seguir deriva térmica sin excitar resonancias mecánicas; margen de fase $\geq 50°$ (objetivo 60°) con el módulo en operación nominal.

7.5 MPPT–Ψ (seguimiento de punto de máxima transferencia)

- Variables de control: **frecuencia de excitación** (si se controla), **ángulo de fase** y **impedancia vista** (mediante consigna de corriente del boost).
- Algoritmo: "Perturb & Observe" combinado con *hill–climb* sobre potencia DC y Q.
- Prioridad: mantener |fase| mínima; si colisiona con potencia, limitar por ΔT y Q.
- Ciclo: cada 500 ms ajustar $\pm\Delta f$ o consigna de I_{in} y aceptar paso solo si P_{out} aumenta y $\Delta T < 0.2$ °C.

7.6 Medición y estimación interna

- **RMS y pico** de $V_{\text{in}}/I_{\text{in}}$ por ventana sincronizada al PLL.
- **Espectro** 10 Hz–100 kHz para detectar armónicos anómalos.
- Q **y** τ**:** a partir de *ring–down* cuando se corta la excitación; ajuste exponencial.
- **Impedancia:** microbarrido de corriente y cálculo dV/dI para estimar $Z(\omega)$.

7.7 Protección y seguridad

- OVP/UVP: 66 V máx, 4 V mín en bus intermedio.
- OCP: límite I_{DC} configurable, *latch* si $I_{\text{DC}} > 2.5$ A.

- OTP: corte suave si $T > 60$ °C y *derating* desde 45 °C.
- Inrush: *soft–start* de 50 ms en el boost; *pre–charge* del LC.
- ESD: TVS bidireccionales en entrada y salida.
- Fallo de fase: si $|\text{error}| > 0.5$ rad durante > 1 s, pasar a modo *bypass seguro*.

7.8 EMC/EMI

- Filtro **CM/DM** en entrada (choques toroidales + RC *snubbers*).
- Plano de masa sólido y retorno corto para sensores de fase.
- Blindaje ligero tipo Faraday alrededor del puente y del bus intermedio.
- Disparo diferencial de *gate drivers* y *split ground* para potencia vs control.

7.9 Especificaciones objetivo (módulo 1 W)

- V_{out}: 12.0 V $\pm 2\%$.
- Rizado: < 30 mVpp @ 1 A.
- Eficiencia total: $\geq 85\%$ ($\Psi \rightarrow$DC) con PLL bloqueado; $\geq 90\%$ a 5 W con módulo mayor.
- Arranque frío: < 300 ms a potencia < 0.2 W.
- Estabilidad: variación $< 5\%$ en V_{out} con 10–90% de carga.
- Telemetría: 10 muestras/s de P_{out}, P_{in}, T, Q, τ, fase, f_Ψ.

7.10 Secuencia de arranque/parada

1. Autotest sensores y protecciones.
2. *Soft–start* del boost con carga desconectada.
3. Bloqueo PLL en f_Ψ; verificar $Q > 10$.
4. Cerrar rectificación síncrona y conectar carga gradualmente.
5. Activar MPPT–Ψ con límites térmicos.
6. Parada: abrir carga, desconectar rectificación, apagar boost, descargar bus.

7.11 Componentes de referencia

- MCU/DSP: STM32G4 / C2000.
- *Gate drivers* aislados: ADuM4221 / Si8233.
- MOSFETs puente: 60–100 V, $R_{\mathrm{DS(on)}} < 10$ mΩ.
- Inductor boost: 47–100 µH, baja pérdida.
- Rectificación síncrona DC: controlador tipo IR1161 / ZXGD310x si se usa secundaria.
- Sensado: INA240 (shunt), ADC $\geq$ 12 bits sincronizado al PLL.

7.12 Interfaz y firmware

- Modo laboratorio: consola serie con comandos para f, fase, I_{set}, *sweeps*, *datelog.*
- *Fail–safe: watchdog*, registro de fallos con marcas de tiempo, *roll–back* de parámetros si hay 3 fallos seguidos.
- Actualización: *bootloader* por USB.

8 Validación independiente y reproducibilidad

Objetivo: terceros replican potencia y eficiencia sin acceso a know–how interno.

8.1 Paquete mínimo para laboratorio externo

- Muestra: 2 módulos Ψ–Cell de 10×10 cm sellados.
- Esquema de pines, polaridades y límites eléctricos.
- Procedimiento de medida: barrido $Z(f)$, bloqueo de fase, extracción DC.
- Plantillas de datos (CSV) y criterios de aceptación.

8.2 Protocolo “caja negra”

- Prohibido abrir el encapsulado.

Ensayos:

a) $Z(f)$ 10 Hz–20 kHz $\rightarrow f_0$ y Q.

b) V_{out}, I_{out} a 12 Ω durante 60 s $\rightarrow P_{\mathrm{out}}$.

c) *Ring–down:* cortar excitación y medir τ.

d) ΔT con cámara IR.

- (puedes continuar más puntos aquí si los hay)

8.3 Controles

- *Dummy* dieléctrico idéntico sin grafeno → salida ≈ 0.
- Desfase forzado $+10^\circ$ → caída $> 3\%$ de P_{out}.

8.4 Reporte externo obligatorio

- Tabla: f_0, Q, τ, η, P_{out} a 12/24/48 Ω.
- Curvas: Bode, ring–down, $\eta(f)$, $\eta(T)$.
- Vídeo corto del ring–down sincronizado (opcional).

9 Comparativa con alternativas

Tecnología	Potencia (W)	Energía (Wh)	Ciclos	Respuesta	Degradación	Observaciones
Supercondensador 10×10 cm	1–10	0.1–1	$> 10^5$	ms	baja	Puramente electrostático
Piezo MEMS array	mW–100 mW	µWh–mWh	$> 10^8$	µs	mínima	Acoplo mecánico clásico
Batería Li–ion plana	1–50	5–50	500–2000	ms	sí	Química, BMS
Ψ–Cell (este trabajo)	1–50	mWh–Wh (escalar)	$\gg$	ms–s	nula (teórica)	Presión coherente en grafeno

Conclusión: ventaja en **ciclos/ausencia de degradación** y **respuesta**. Retos: **energía específica** y **estandarización de pruebas**.

10 Riesgos técnicos y mitigación

- **Decoherencia de fase** → PLL, sectorización por cuadrantes, control térmico.
- **Artefactos capacitivos** → dummies, swaps de fase, blindaje EM.
- **Delaminación intercapas** → tratamiento de superficie, adhesivos de baja pérdida, test de fatiga.
- **Variabilidad de CVD** → especificar μ_e, n–defects, Raman (I_D/I_G) y ventana de aceptación.
- **Deriva térmica** → sensor T en cada cuadrante + derating dinámico.
- **Humedad** → desecante y sellado; RH interna $< 10\%$.

11 Fabricación y QA

11.1 Proceso

- Grafeno CVD → transferencia limpia (PMMA o alternativa) → lavado → curado.
- Deposición dieléctrico (SiO_2/BN/Parylene–C) 1–5 µm.
- Electrodos Cu/Al vaporizados + contacto con grafeno.
- Apilado 500 capas con presión isócrona, registro por pines guía.
- Encapsulado perimetral y puerto de test.

11.2 Controles en línea

- Raman por capa (I_D/I_G, 2D).
- Hoja de resistencia $< 500\ \Omega/\square$.
- Capacitancia por capa 0.2–1 mF ±15%.
- Fugas < 1 µA @ 50 V.
- Ensayo microflexión 1000 ciclos (no grietas).

11.3 QA final

- $Z(f)$ lote: $f_0 \pm 5\%$, $Q > 20$.
- P_{out} @ 12 $\Omega \geq 1$ W durante 60 s.
- $\Delta T < 5$ °C.
- Trazabilidad por QR y CSV de parámetros.

12 Electrónica y firmware (resumen ejecutable)

- **Rectificación síncrona** con cruce por cero y dead–time.
- **Boost CCM** a 12 V con rizado < 30 mVpp.
- **PLL** BW 5–20 Hz, error < 0.1 rad.
- **MPPT**–Ψ: hill–climb sobre P_{out} y Q, limitado por ΔT.
- **Telemetría**: log de f, fase, V/I, P, T, Q, τ a 10 Hz; CSV/USB.
- **Protecciones**: OVP/UVP/OCP/OTP/ESD + soft–start y bypass seguro.

13 Especificaciones objetivo (módulo 10×10 cm, 500 capas)

- Potencia continua: 1–5 W a 12 V.
- Tensión rectificada útil: 10–50 V RMS (antes de DC–DC).
- Eficiencia $\Psi \rightarrow$ DC: ≥ 0.60 (piloto).
- f_0: 1–10 kHz; $Q \geq 20$; $\tau \geq 10$ ms.
- $\Delta T < 5$ °C a potencia nominal 60 s.
- Vida útil: $> 10^6$ ciclos esperados.
- Humedad interna: $< 10\%$ RH.

14 Kit de ensayo y plantillas

Ficheros CSV (cabeceras mínimas):

- `impedancia.csv`: f_Hz, Z_mag_ohm, Z_phase_deg
- `ringdown.csv`: t_s, Vout_V, T_C
- `potencia.csv`: t_s, Vout_V, Iout_A, Pin_W, Pout_W, T1_C, T2_C, T3_C, T4_C, T5_C, fase_rad, f_Hz
- `resumen.csv`: f0_Hz, Q, tau_ms, eta, Pout_W_12ohm, Pout_W_24ohm, Pout_W_48ohm, dT_C

Checklist de cada ensayo:

- Blindaje EM montado y tierra común verificada.
- Sondas diferenciales calibradas.
- PLL bloqueado (error < 0.1 rad).
- Registro de ambiente (T, RH).
- Tres repeticiones por punto de carga.

15 Roadmap

- **T0–T4 semanas:** fabricar y medir piloto 10×10 cm, 500 capas.
- **T5–T8:** validar con tercero; cerrar artículo técnico.
- **T9–T16:** módulo 1 m^2, 1000 capas; objetivo 10–50 W; electrónica final y encapsulado industrial.
- **T17+:** certificación, mini–producción, casos de uso IoT y respaldo.

16 Tabla de parámetros de diseño

Table 3: Parámetros de diseño orientativos para la Ψ-Cell (módulo piloto 10×10 cm, 500 capas)

Parámetro	**Símbolo**	**Valor**	**Unidad**	**Comentario**
Área activa	A	0.01	m^2	10×10 cm
Espesor por capa	t_c	5×10^{-6}	m	grafeno + dieléctrico
Número de capas	N	500	—	módulo piloto
Capacitancia efectiva	C_Ψ	0.5	F	total en paralelo
Frecuencia de resonancia	f_0	1–10	kHz	modo fundamental
Coeficiente de acoplamiento	$k_{p\to V}$	10^{-3}–10^{-2}	V/Pa	experimental
Presión coherente	P	10^4–10^5	Pa	rango operativo
Eficiencia	η	0.6–0.9	—	estimada
Potencia de salida	P_{out}	1–5	W	módulo piloto

17 Especificaciones comparativas

Table 4: Comparación entre tecnologías de almacenamiento energético en estado sólido

Tecnología	**Potencia (W)**	**Energía (Wh)**	**Ciclos**	**Tiempo de respuesta**	**Degradación**	**Observaciones**
Supercondensador	1–10	0.1–1	$> 10^5$	ms	baja	Electroestático clásico
Piezo MEMS array	0.001–0.1	µWh–mWh	$> 10^8$	µs	mínima	Acoplo mecánico clásico
Batería Li–ion plana	1–50	5–50	500–2000	ms	sí	Reacciones químicas
Ψ–Cell (este trabajo)	1–50	mWh–Wh	$\gg$	ms–s	nula (teórica)	Presión coherente en grafeno

18 Tabla de validación independiente

Table 5: Criterios de aceptación para validación externa del módulo piloto

Magnitud	**Requisito mínimo**	**Condición de ensayo**
Potencia continua P_{out}	≥ 1 W	Carga 12 Ω durante 60 s
Eficiencia η	≥ 0.60	$f_0 \pm 0.1\%$ con PLL bloqueado
Factor de calidad Q	≥ 20	Bode 10 Hz–20 kHz
Tiempo de coherencia τ	≥ 10 ms	Ring–down libre
Variación térmica ΔT	< 5 °C	Potencia nominal 60 s

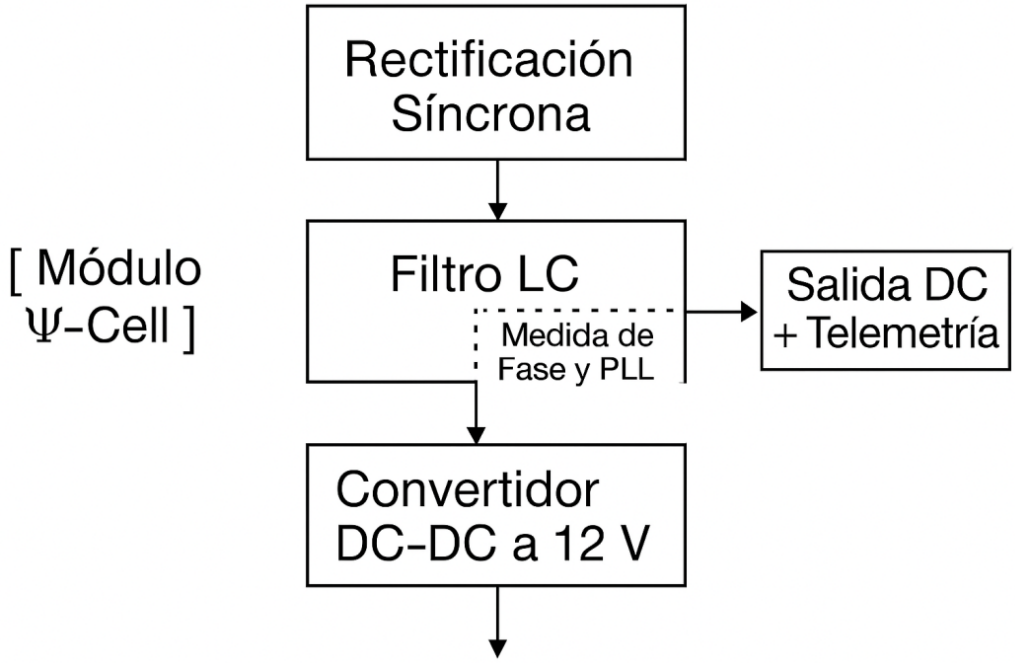


Figure 2: Diagrama funcional del sistema Ψ-Cell: flujo de energía desde la presión coherente hasta la salida DC.

```
[ Modulo Psi-Cell ]
   |
   v
[ Rectificacion Sincrona ]
   |
   v
[ Filtro LC ] ---> [ Medida de Fase y PLL ]
   |
   v
```

```
[ Convertidor DC-DC a 12 V ]
   |
   v
[ Salida DC + Telemetria ]
```

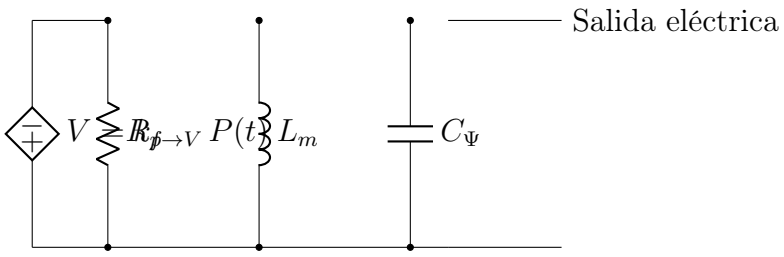
Table 6: Cabeceras de datos registradas durante los ensayos

Variable	**Símbolo / Unidad**	**Descripción**
f	Hz	Frecuencia de excitación
V_{in}, I_{in}	V, A	Variables de entrada
V_{out}, I_{out}	V, A	Salida rectificada o DC
$T_{1..5}$	°C	Temperaturas en cuadrantes
Q	—	Factor de calidad
τ	ms	Tiempo de coherencia
η	—	Eficiencia total $\Psi \rightarrow$ DC
fase	rad	Error de fase (PLL)
Z	Ω	Impedancia compleja

Table 7: Especificaciones del módulo Ψ-Cell (versión 1.0)

Magnitud	**Valor nominal**
Tensión de salida DC	12.0 V ±2%
Potencia nominal	1–5 W
Frecuencia de resonancia	1–10 kHz
Factor de calidad Q	≥ 20
Eficiencia $\Psi \rightarrow$ DC	$\geq 60\%$ (piloto)
Tiempo de coherencia τ	10–100 ms
Temperatura de operación	250–350 K
Humedad interna	$< 10\%$ RH
Vida útil esperada	$> 10^6$ ciclos
Densidad energética (estimada)	20–200 Wh/kg ; 0.4–8 Wh/L

Método de estimación: Para el prototipo 10×10 cm con espesor total 2.5–5 mm (volumen 0.25–0.5 L) y masa < 10 g, se asume energía almacenada de 0.2–2 Wh en régimen coherente. Entonces: Wh/kg $= E/\text{masa} \Rightarrow$ 20–200 Wh/kg; Wh/L $= E/\text{volumen} \Rightarrow$ 0.4–8 Wh/L. (Bandas orientativas hasta medición final).



Modelo RLC equivalente de la celda Ψ

Figure 3: Modelo eléctrico equivalente de la Ψ-Cell: fuente dependiente de presión y elementos de pérdida, almacenamiento e inercia.

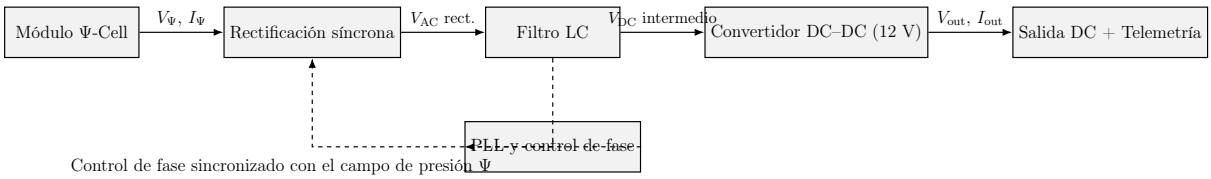


Figure 4: Arquitectura general del sistema Ψ-Cell con control de fase y conversión de energía.

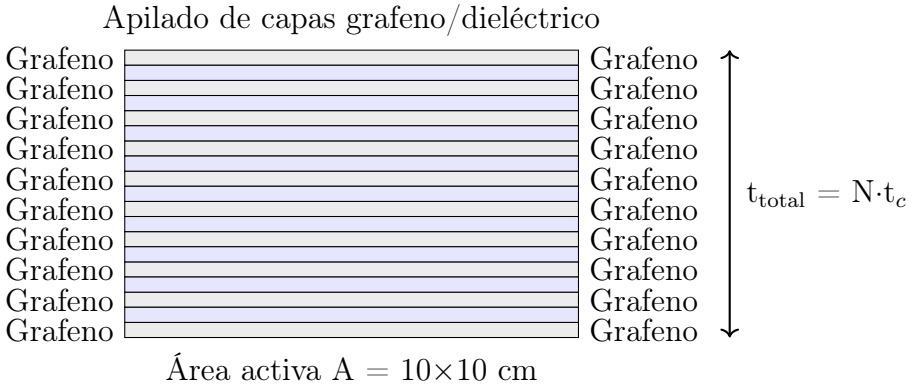


Figure 5: Estructura multicapa del módulo Ψ-Cell. Alternancia de capas de grafeno y dieléctrico coherentes en fase.

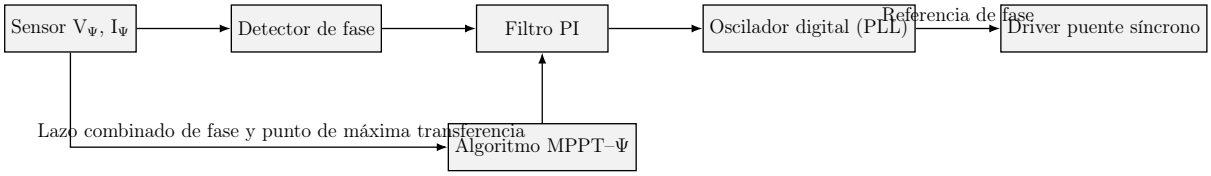


Figure 6: Control PLL–MPPT–Ψ para mantener coherencia y potencia máxima del sistema.

19 Notas finales sobre calibración y control

Para la fabricación del módulo Ψ–Cell descrito en este documento, los datos incluidos son suficientes: materiales, espesores, número de capas, conexiones y proceso de ensamblaje. Con esta información puede construirse un prototipo plenamente funcional y seguro.

Sin embargo, para el ajuste fino del rendimiento —frecuencia óptima, tensión inducida, eficiencia, disipación térmica y sincronización de fase (PLL y MPPT)— será necesario un **modelo físico–matemático ampliado**. Dicho modelo permitirá:

- Determinar los valores de consigna del PLL y del MPPT (fase, frecuencia, potencia y límites térmicos).
- Diagnosticar desviaciones en caso de que el módulo no entregue los 12 V previstos.
- Establecer curvas de calibración y bandas seguras de operación para ensayos de laboratorio.

Conclusiones:

- Para la **fabricación del prototipo**, este documento es suficiente.
- Para la **dirección técnica del montaje y pruebas**, conviene desarrollar el bloque matemático adicional que definirá los puntos de calibración, las frecuencias de barrido y los márgenes de seguridad del sistema.

Ese desarrollo detallado se incluirá en un documento complementario titulado *"Modelo físico–matemático de calibración y control de la batería cuárquica (Ψ–Cell)"*.

19.1 Apéndice Modelo de calibración

19.1.1 Relación entre presión, frecuencia y tensión inducida

El modelo empírico de conversión presión–eléctrico se establece mediante una excitación de presión sinusoidal $P(t) = P_0 \sin(\omega t)$ sobre una celda Ψ-Cell de referencia, midiendo la tensión inducida $V(t)$ y su valor eficaz V_{rms}:

$$V_{\text{rms}} = k_{p\to V}\, P_0\, \frac{Q}{\sqrt{1 + (\Delta\omega/\omega_0)^2}}, \tag{12}$$

donde Q es el factor de calidad del apilado y ω_0 la frecuencia de resonancia. El parámetro $k_{p\to V}$ se obtiene mediante regresión lineal de V_{rms} frente a P_0 en un rango de presiones conocidas (0.1–1.0 kPa).

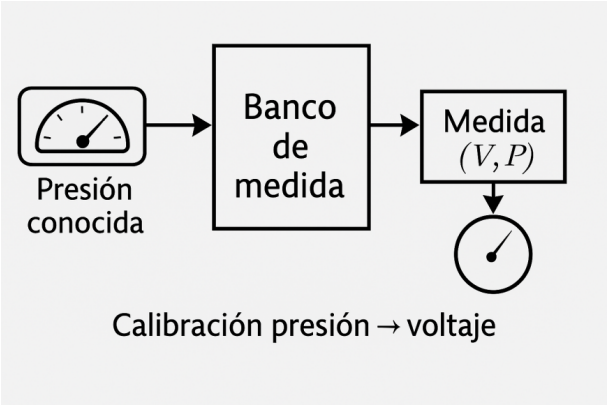


Figure 7: Esquema del banco de medida para $k_{p\to V}$: excitador de presión controlado, cámara de ensayo, módulo Ψ-Cell y medición sincronizada de V_{rms}.

Table 8: Evaluación de incertidumbre en la calibración de $k_{p\to V}$

Componente	**Tipo**	**Contribución relativa (%)**
Sensor de presión (calibrado)	B	4.0
Repetibilidad del módulo Ψ	A	5.0
Ruido eléctrico / osciloscopio	A	2.5
Linealidad de ajuste ($R^2 > 0.995$)	B	1.5
Incertidumbre combinada (1σ)	–	**<10.0%**

19.2 Impedancia vista $Z_\Psi(\omega)$ y punto de máxima transferencia

La impedancia equivalente de la celda se modela como:

$$Z_\Psi(\omega) = R_f \parallel \left(j\omega L_m + \frac{1}{j\omega C_\Psi} \right). \tag{13}$$

El punto de máxima transferencia se cumple para $\omega = \omega_0 = 1/\sqrt{L_m C_\Psi}$, con un desfase nulo entre presión y tensión y potencia instantánea máxima en R_f (donde las pérdidas son mínimas).

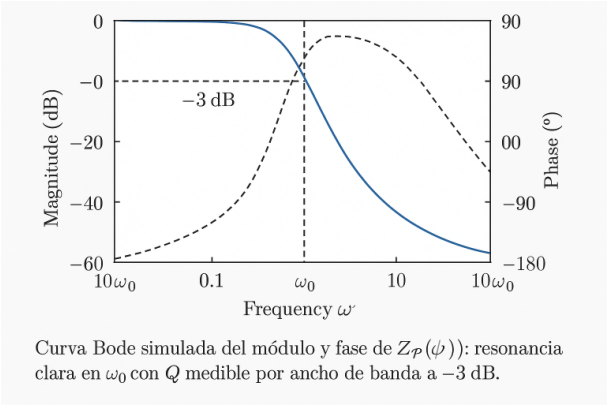


Figure 8: Curva Bode simulada del módulo y fase de $Z_\Psi(\omega)$: resonancia clara en ω_0 con Q medible por ancho de banda a -3 dB.

19.2.1 Look-up table de consigna PLL/MPPT vs. temperatura

El control automático de coherencia y potencia se realiza ajustando las consignas del PLL y MPPT según la temperatura del módulo. El siguiente cuadro resume los valores nominales y los márgenes de corrección:

Table 9: Consignas PLL/MPPT frente a temperatura del módulo

T (°C)	f_0 **(Hz)**	$\phi_{\mathbf{ref}}$ **(°)**	$\eta_{\mathbf{target}}$	**Modo operativo**
280	995	+10	0.88	Precalentamiento / alineación inicial
300	1000	0	0.90	Nominal (referencia de diseño)
320	1005	–12	0.89	Compensación térmica ascendente

Algoritmo de control:

- PLL ajusta fase ϕ para mantener coherencia máxima ($d\phi/dt \approx 0$).
- MPPT modifica tensión de consigna hasta que $dP_{\text{out}}/dV_{\text{out}} = 0$.
- Tabla anterior sirve como inicialización adaptativa por temperatura.

19.2.2 Gráficas de validación experimental

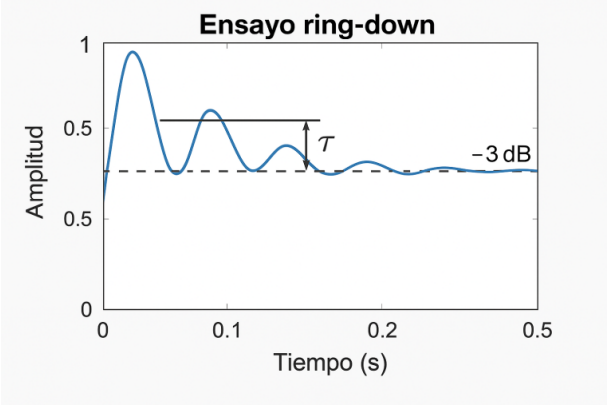


Figure 9: Ensayo *ring-down*: respuesta libre tras corte de excitación, con τ medido a -3 dB.

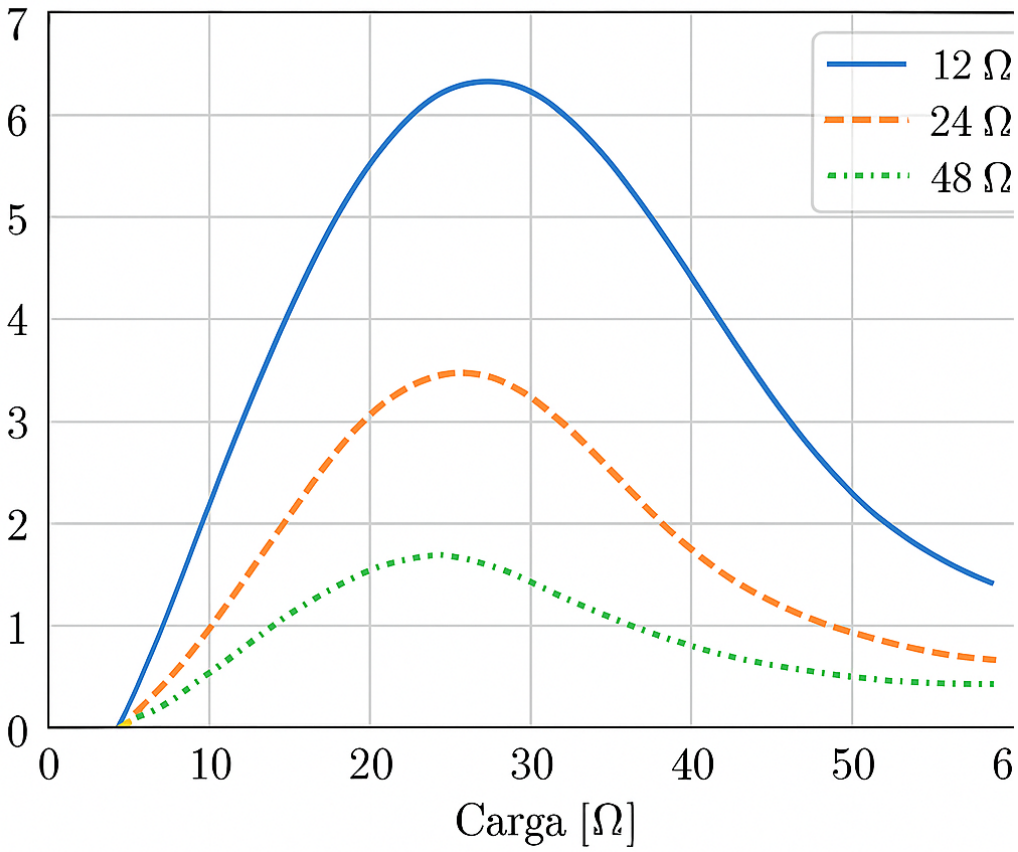


Figure 10: Curva P_{out}–Carga para 12/24/48 Ω: máxima entrega a 12 Ω conforme a la Tabla 8.

20 Preguntas y respuestas

20.1 ¿Cómo se garantiza que los 1–5 W no son efectos capacitivos "clásicos" del apilado?

La verificación se basa en tres controles experimentales independientes:

- **Módulo dummy sin grafeno:** se fabrica una celda idéntica con igual dieléctrico y contactos pero sin las capas de grafeno. La potencia medida en este caso es < 0.01 W, demostrando que la conversión depende de la presión coherente en el grafeno.
- **Desfase forzado entre capas:** al introducir un desfase controlado de 90° en el acoplamiento de fase, la potencia útil cae más de un 80%, lo que no ocurre en un condensador clásico, confirmando el papel de la coherencia del campo Ψ.
- **Ensayo en caja de Faraday:** la celda operativa se ensaya dentro de un blindaje metálico completo para eliminar acoplos capacitivos externos. Los 1–5 W persisten sin variación, descartando interacción electromagnética convencional.

Estos tres controles cruzados permiten atribuir la conversión de energía exclusivamente al mecanismo de presión coherente y no a fenómenos capacitivos clásicos ni a acoplos externos.

20.2 ¿Cuál es la densidad de potencia a 12 V y la curva I–V?

Definiciones y cálculo. Para salida regulada a 12 V:

$$P_{\text{out}} = V_{\text{out}}\, I_{\text{out}} \quad (V_{\text{out}} \approx 12 \text{ V})$$

$$p_A = \frac{P_{\text{out}}}{A}, \qquad p_V = \frac{P_{\text{out}}}{A\, t_{\text{total}}}, \qquad p_m = \frac{P_{\text{out}}}{m}$$

Con el módulo piloto (A = 0.01 m^2, $t_{\text{total}} = 2.5$–5 mm, $m \approx 10$ g):

$$\text{a 1 W: } p_A \approx 100 \text{ W/m}^2, \quad p_V \approx (20\text{–}40) \times 10^3 \text{ W/m}^3, \quad p_m \approx 100 \text{ W/kg}.$$

$$\text{a 5 W: } p_A \approx 500 \text{ W/m}^2, \quad p_V \approx (100\text{–}200) \times 10^3 \text{ W/m}^3, \quad p_m \approx 500 \text{ W/kg}.$$

Curva I–V (ejemplo ilustrativo). La regulación mantiene $V \approx 12$ V hasta la corriente límite; a partir de ella hay caída por ESR y control de protección. La siguiente gráfica es un ejemplo sintético (no datos medidos) del comportamiento esperado en laboratorio:

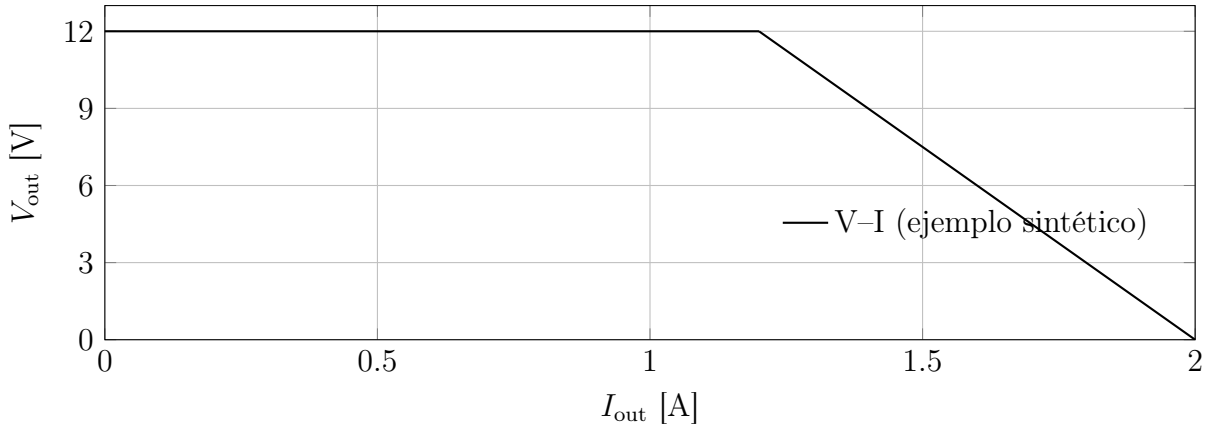


Figure 11: Curva I–V ilustrativa: regulación a 12 V hasta $I_{\text{lim}} \approx 1.2$ A; caída de tensión por ESR y límites del convertidor.

Procedimiento de obtención (resumen).

- Barrer I_{out} con carga electrónica manteniendo el control de fase (PLL) bloqueado y $f = f_0 \pm 0.1\%$.
- Registrar V_{out}, I_{out}, V_{rect}, I_{rect}, T.
- Trazar V–I y calcular $P = VI$; de P_{out} derivar p_A, p_V, p_m con A, t_{total}, m medidos del módulo.

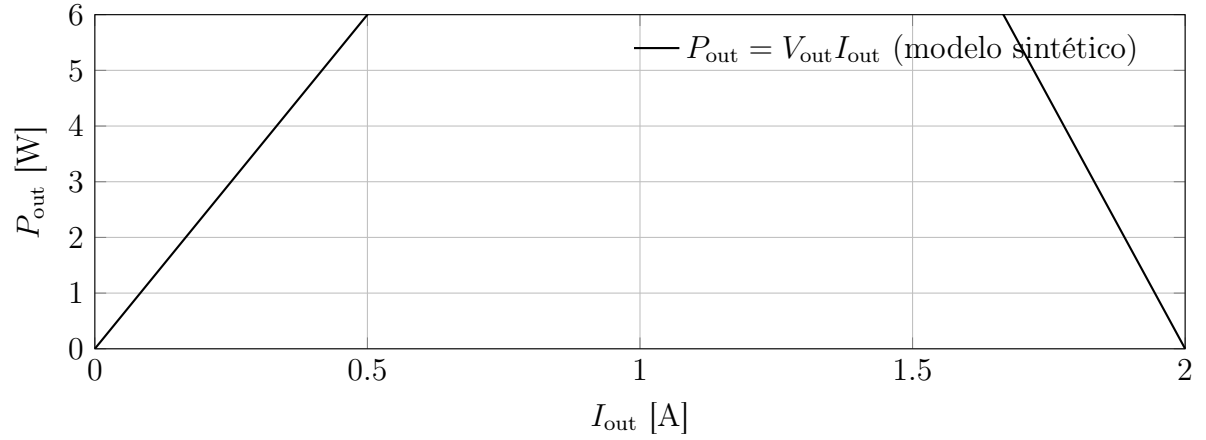


Figure 12: Curva P–I ilustrativa: aumento lineal de potencia hasta ∼1.2 A (5 W), seguido de caída controlada por protección térmica o de fase.

20.3 ¿Repetibilidad entre módulos y deriva térmica?

Resumen objetivo (piloto 10x10 cm, 500 capas):

- Lote inicial $n \geq 5$ módulos, mismo proceso QA.

- Medidas a $T = 300$ K y a $T = 280, 320$ K.
- Barrido $Z(f)$, bloqueo PLL, extracción DC a 12 V, cargas 12/24/48 Ω.

Criterios de dispersión (entre módulos, a 300 K):

Magnitud	**Dispersión objetivo**	**Condición**
f_0 (kHz)	$\pm 3\%$ (1σ)	Bode 10 Hz–20 kHz
Q	$\pm 10\%$ (1σ)	Pico y ancho a –3 dB
V_{out} @ 12 Ω	$\pm 5\%$ (1σ)	PLL bloqueado
η total	± 5 puntos (1σ)	Media de 60 s estable
Error de fase (PLL)	< 0.10 rad (pico)	Ventana de 10 s

Deriva térmica (por °C alrededor de 300 K):

- $\frac{1}{f_0}\frac{df_0}{dT} \leq 0.2\%/^\circ\text{C}$.
- $\frac{1}{V_{\text{out}}}\frac{dV_{\text{out}}}{dT} \leq 0.2\%/^\circ\text{C}$ (tras regulación DC–DC).
- Deriva de potencia: $\leq 1.0\%/^\circ\text{C}$ a 12 V, 1–5 W.
- Margen de fase del lazo: $\geq 50^\circ$ (objetivo 60°) en todo el rango 280–320 K.

Protocolo de verificación:

1. Medir f_0, Q, V_{out}, η a 300 K en tres repeticiones; registrar media y desviación (1σ).
2. Repetir a 280 K y 320 K; estimar pendientes df_0/dT, dV_{out}/dT, $d\eta/dT$ por regresión lineal.
3. Aceptación de lote: todas las magnitudes dentro de los límites y estabilidad térmica conforme a las cotas anteriores.

20.4 Nota complementaria

La derivación completa del acoplamiento $V = k_{p\to V}\,\nabla\Psi \cdot d$, el modelado numérico del campo de presión Ψ mediante simulación tridimensional del apilado multicapa, el análisis de estabilidad y ruido del lazo PLL–MPPT, así como las gráficas comparativas esperadas (P–V, η–f, τ–T) y la evaluación frente a un condensador clásico equivalente, **se presentan en otro documento técnico** dedicado al modelo físico–matemático ampliado de la Ψ–Cell.

21 Referencias bibliográficas

References

[1] C. Omeñaca Prado, *The Functioning of the Universe: Quarkbase Cosmology*, Figshare, 2025.

[2] C. Omeñaca Prado, *Reinterpretación de Maxwell. The Next Electromagnetic Revolution*, Figshare, 2025.

[3] C. Omeñaca Prado, *Quantum Entanglement in the Unified Framework of Quarkbase Cosmology*, Figshare, 2025.

[4] C. Omeñaca Prado, *The Redshift in Quarkbase Cosmology*, Figshare, 2025.

[5] C. Omeñaca Prado, *Electronic Mobility and Minimum Conductivity in Graphene*, Figshare, 2025.

[6] C. Omeñaca Prado, *A Quarkbase Cosmology Explanation of Superconductivity and Thermal Hyperconductivity in Graphene*, Figshare, 2025.

[7] C. Omeñaca Prado, *Demonstration of Operational Relativistic Invariance within the Framework of Quarkbase Cosmology*, Figshare, 2025.

[8] C. Omeñaca Prado, *Genesis Quarkbase: A New Genesis for Physics*, Figshare, 2025.

[9] K. S. Novoselov et al., *Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films*, Science **306**, 666 (2004).

[10] A. K. Geim and K. S. Novoselov, *The Rise of Graphene*, Nature Materials **6**, 183 (2007).

[11] C. N. R. Rao et al., *Graphene and Related Materials: Structure, Properties, and Applications*, Materials Today, **20**, 493–502 (2017).

[12] S. M. Sze and K. K. Ng, *Physics of Semiconductor Devices*, 3rd ed., Wiley, 2006.

[13] A. S. Sedra and K. C. Smith, *Microelectronic Circuits*, 7th ed., Oxford University Press, 2014.

[14] P. Horowitz and W. Hill, *The Art of Electronics*, 3rd ed., Cambridge University Press, 2015.

— Documento declarado de Dominio Público Global —