Pontificia Universidad JAVERIANA Bogotá | Facultad de Ingeniería

| VIGILADA MINEDUCACIÓN |

ExpoSolar Colombia 2026 — 10 Aniversario — Energía renovable, futuro imparable

Microrredes: Una alternativa sostenible para la transición energética y la mitigación del cambio climático

Dr. **Luis Gabriel Marín Collazos**

Grupo de investigación CEPIT

Sistemas de control, electrónica de potencia y gestión de la innovación tecnológica
Facultad de Ingeniería
Pontificia Universidad Javeriana Bogotá

En alianza con

I+D Electrónica — Chroma Systems Solutions

28 al 30 Octubre | Corferias Bogotá

El hub de los negocios de la Energía Solar para Latinoamérica y el Caribe

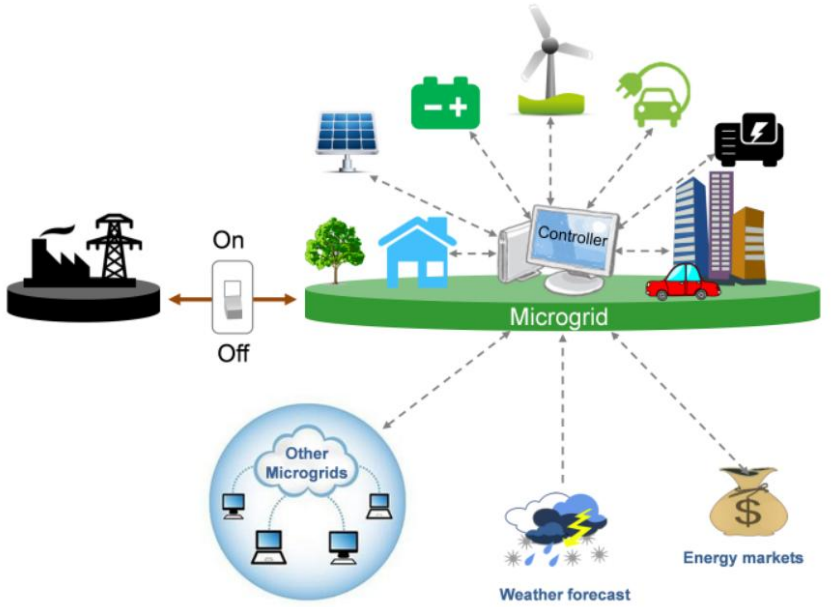
Agenda

1. Recursos Energéticos Distribuidos (DERs)
2. Microrredes: concepto y valor para la industria
3. Operación y planeación de microrredes
4. Servicios complementarios desde las microrredes
5. Academia + Industria: ruta para masificar el uso de las microrredes en Colombia

¿Qué son las microrredes?

✓¿Por qué necesitamos las Microrredes?

✓¿Cuál es el papel de los Recursos Energéticos Distribuidos (DERs) en las microrredes?

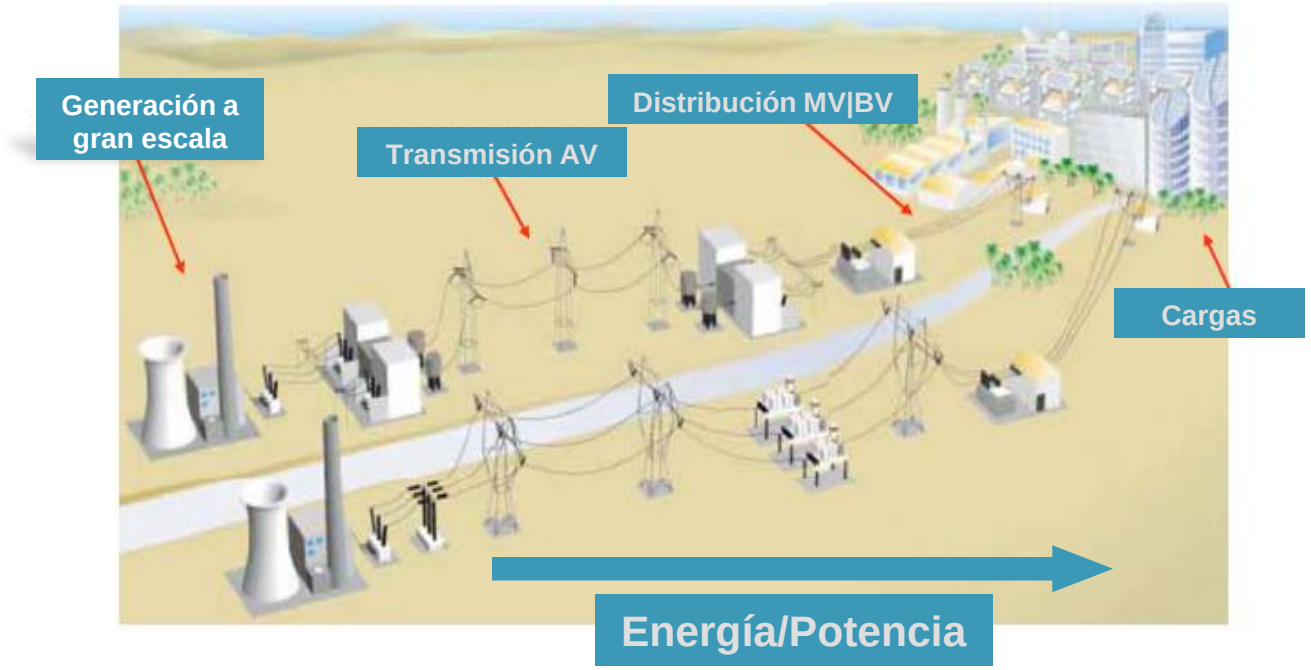


Tomada de: https://building-microgrid.lbl.gov/about-microgrids

- Las microrredes actualmente son un **tópico de investigación** de mucho **interés mundial**.
- Se requieren nuevas regulaciones para pasar de los experimentos (laboratorios) a **contextos reales**.
- La **regulación debe ser dinámica** en función de las nuevas necesidades técnicas, ambientales económicas y sociales.

01 Recursos Energéticos Distribuidos

Sistema eléctrico tradicional



Algunas de sus características son:

- El diseño de la red supone un **flujo de potencia unidireccional**: diseño para el peor de los casos, diseño más simple de protección y gestión de fallas.
- El sistema **es inteligente = controlado** en el nivel de transmisión, y solo monitoreado en las subestaciones de HV / MV y MV / LV
- No hay mediciones en el lado de bajo voltaje (LV), aparte de las lecturas de potencia de los **medidores inteligentes** que actualmente puedan estar instalados.

En las últimas décadas, la red ha experimentado una revolución causada por la **generación distribuida**, la **generación renovable distribuida** y la **generación renovable**

¿Qué son los Recursos Energéticos Distribuidos (DERs)?

Definición

Recursos energéticos **gestionables** conectados a las redes de distribución o en las instalaciones de los usuarios finales: generación distribuida, almacenamiento, respuesta de la demanda y vehículos eléctricos.

Lo que los hace diferentes

- **Están cerca de la carga** (media y baja tensión)
- **Se conectan con electrónica de potencia**: inversores rápidos y programables
- **Son controlables**: pueden despacharse y prestar servicios a la red

Generación renovable distribuida

FV, eólica, PCH, biomasa

Generación convencional y cogeneración

Diésel, gas, microturbinas, CHP

Almacenamiento

Baterías, hidrógeno, supercapacitores

Vehículos eléctricos

Carga inteligente y V2G

Respuesta de la demanda

Cargas controlables y flexibles

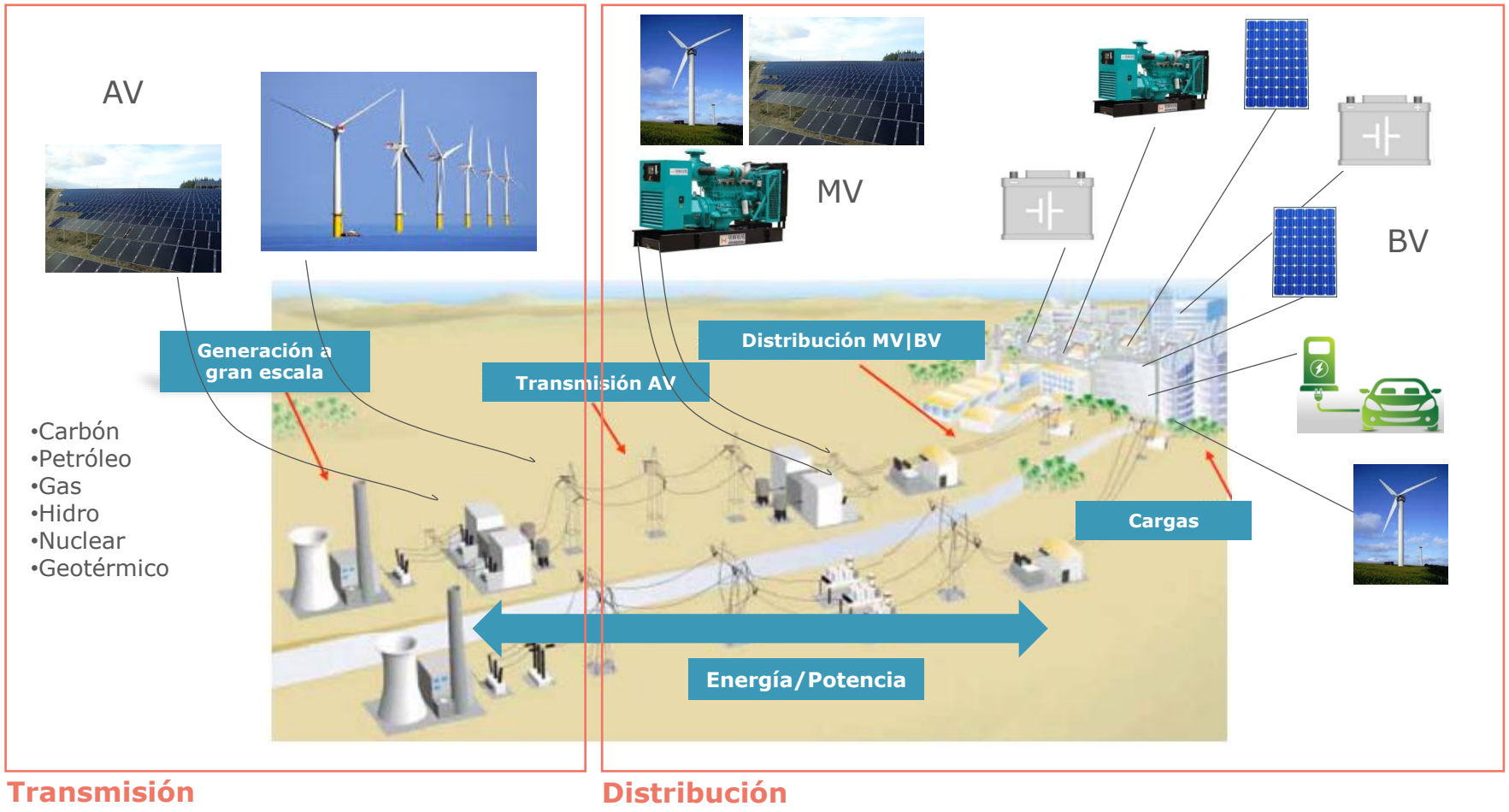
Autogeneradores

AGPE / AGGE (CREG 174 de 2021)

Fuente: CIDET (2019), Integración de los recursos energéticos distribuidos en el sistema eléctrico colombiano; CREG 174 de 2021.

Sistema eléctrico actual

El sistema de **generación, transmisión y distribución** asume una forma completamente diferente al tradicional:



De red pasiva a red activa: los retos técnicos de los DERs

Diseño clásico

- Flujo unidireccional: subestación → carga
- Cargas pasivas, una sola fuente
- Tensión cae con la distancia

Con alta penetración de DERs

- Flujo bidireccional
- Múltiples fuentes con electrónica de potencia
- Los supuestos de diseño ya no se cumplen

Perfiles de tensión

Sobretensión por flujo inverso al mediodía solar

Inercia y frecuencia

Menos máquinas síncronas → mayor RoCoF

Protecciones

Más corriente de falla y pérdida de selectividad

Isla no deseada

Zonas energizadas sin control tras una falla

Interacción de convertidores

Oscilaciones en redes débiles (PLL, lazos)

Congestión térmica

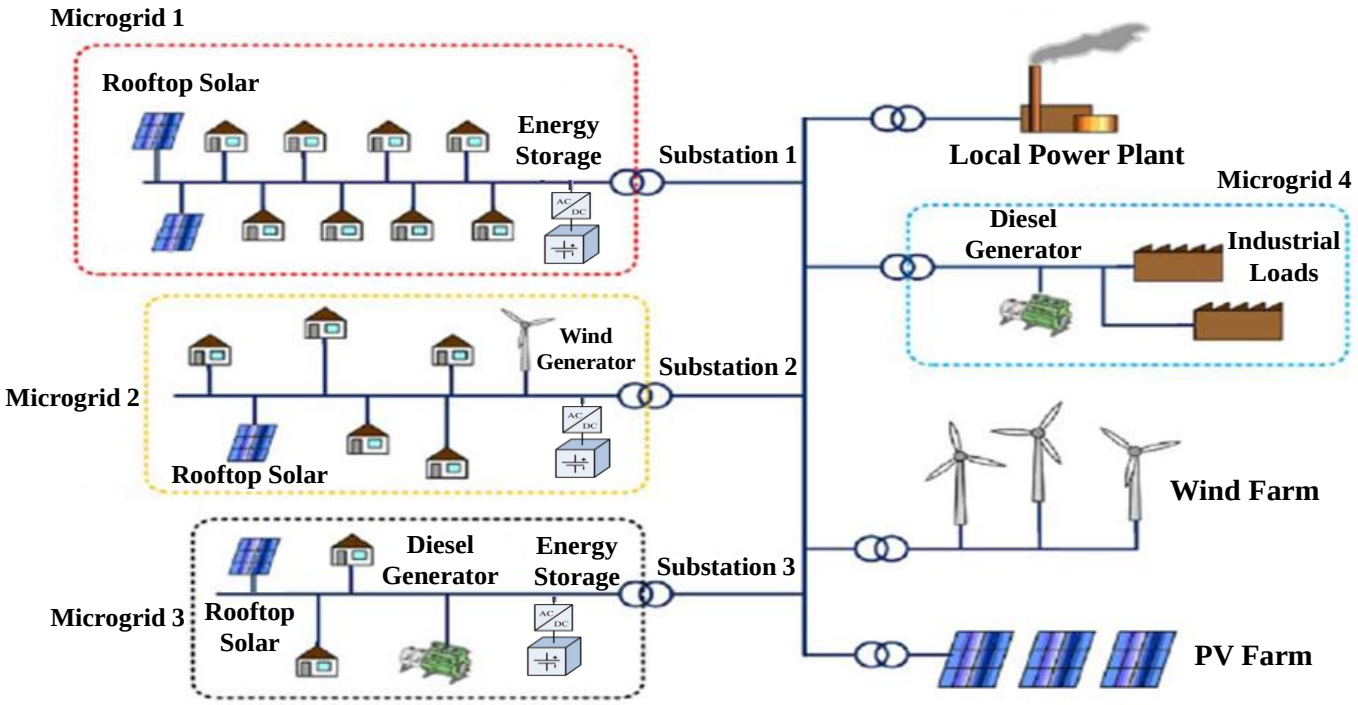
Sobrecarga de conductores y transformadores

Causa raíz común: se rompe el supuesto de fuente única y flujo unidireccional. Cada reto define un servicio que la red necesita.

02 Microrredes

Microrredes

Surgen como alternativa para superar el desafío de integrar recursos de energía distribuidos (DERs) en el sistema eléctrico.



Adaptada de: M. Falahi, et.al "Dynamic model predictive-based energy management of DG integrated distribution systems," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 28, no. 4, pp. 2217–2227, 2013.

- ✓ Masiva adopción de generación renovable
- ✓ Desarrollo Sostenible
- ✓ Reducción emisiones de CO2
- ✓ Resiliencia del sistema
- ✓ Estabilidad del sistema
- ✓ Nuevas oportunidades de mercado
- ✓ Calidad del servicio y calidad de la energía
- ✓ Manejo de la demanda (DSM)

Las microrredes se definen como un grupo de recursos de energéticos distribuidos (DERs) interconectados con fronteras eléctricas claramente definidas que actúan como una única entidad controlable con respecto a la red.

¿Qué es (y qué no es) una microrred?

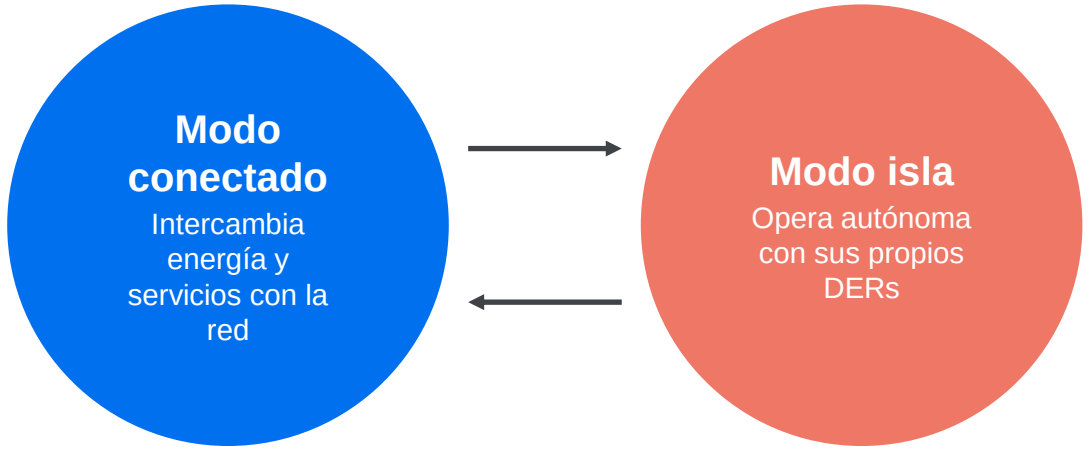
Sí es una microrred cuando…

- Agrupa cargas y DERs con fronteras eléctricas claramente definidas
- Actúa como una única entidad controlable frente a la red
- Puede operar conectada o en isla de forma intencional
- Tiene un sistema de control y gestión de la energía (EMS)

No es una microrred…

- Una sola tecnología (p. ej. una microturbina en un edificio): eso es generación distribuida
- Un conjunto de generadores que no se coordinan entre sí

Modos de operación



→ Falla en la red o desconexión programada

← Resincronización (V, f, ángulo) y reconexión

Clave industrial: la transición a isla sin interrumpir procesos críticos es lo que convierte la microrred en resiliencia.

Basado en: CIGRE WG C6.22 (Microgrid Evolution Roadmap); IEEE 1547.4 (operación intencional en isla).

Otras microrredes



Microrredes en aviones



Microrredes navales



Microrredes en comunidades aisladas

Observación:

La generación distribuida NO se limita a las fuentes fotovoltaicas, especialmente en las zonas rurales. La generación distribuida también se basa en generadores síncronos, Diesel, gas, hidroeléctricos, biomasa, Hidrógeno.

¿Por qué una microrred en la industria?

Continuidad y resiliencia

Operación en isla ante fallas de la red para procesos críticos.

Calidad de potencia

Soporte de tensión, frecuencia, armónicos y desbalances.

Menor costo de energía

Autoconsumo, recorte de picos de demanda y arbitraje tarifario.

Gestión de reactiva

Inversores y baterías compensan Q y evitan cargos por reactiva excedida.

Descarbonización

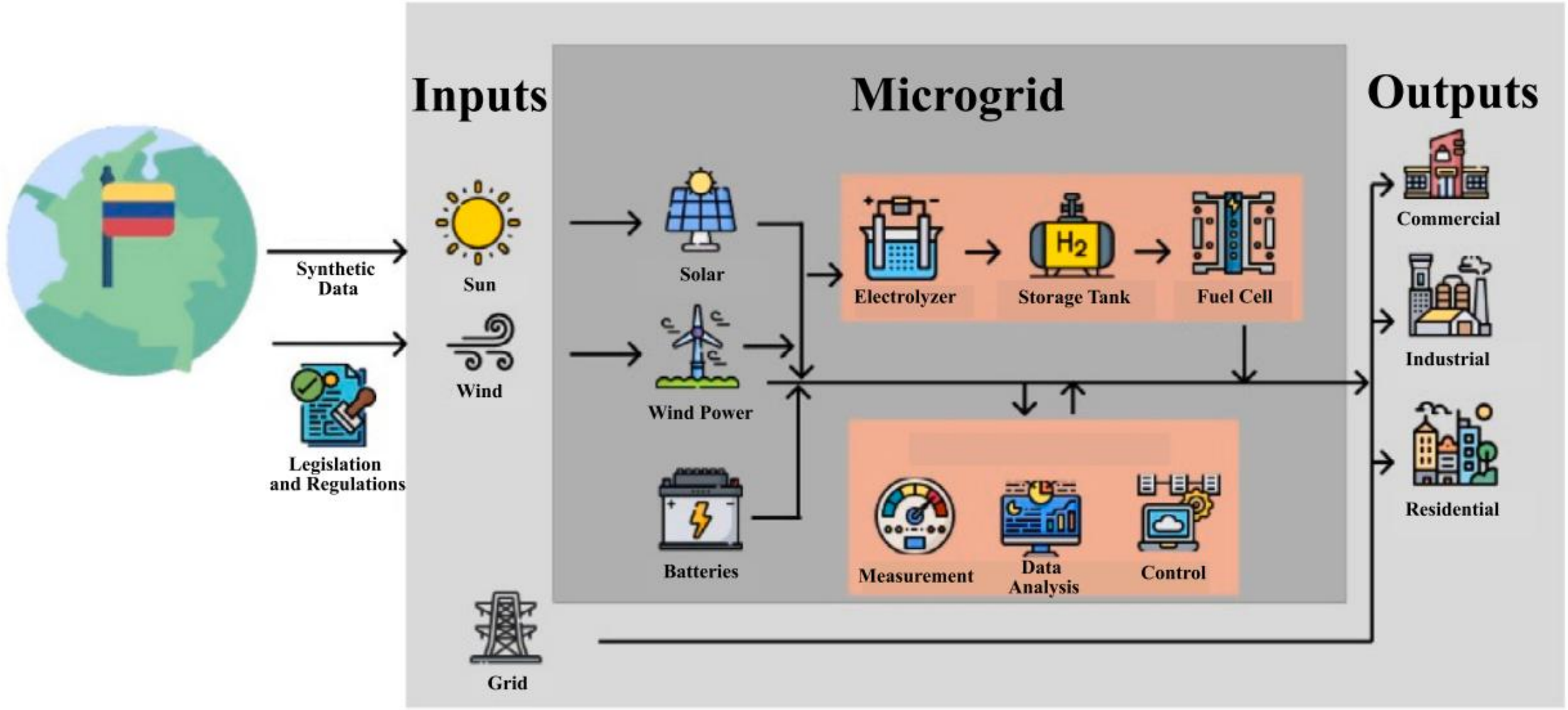
Reducción de emisiones y trazabilidad para metas ESG.

Nuevos ingresos

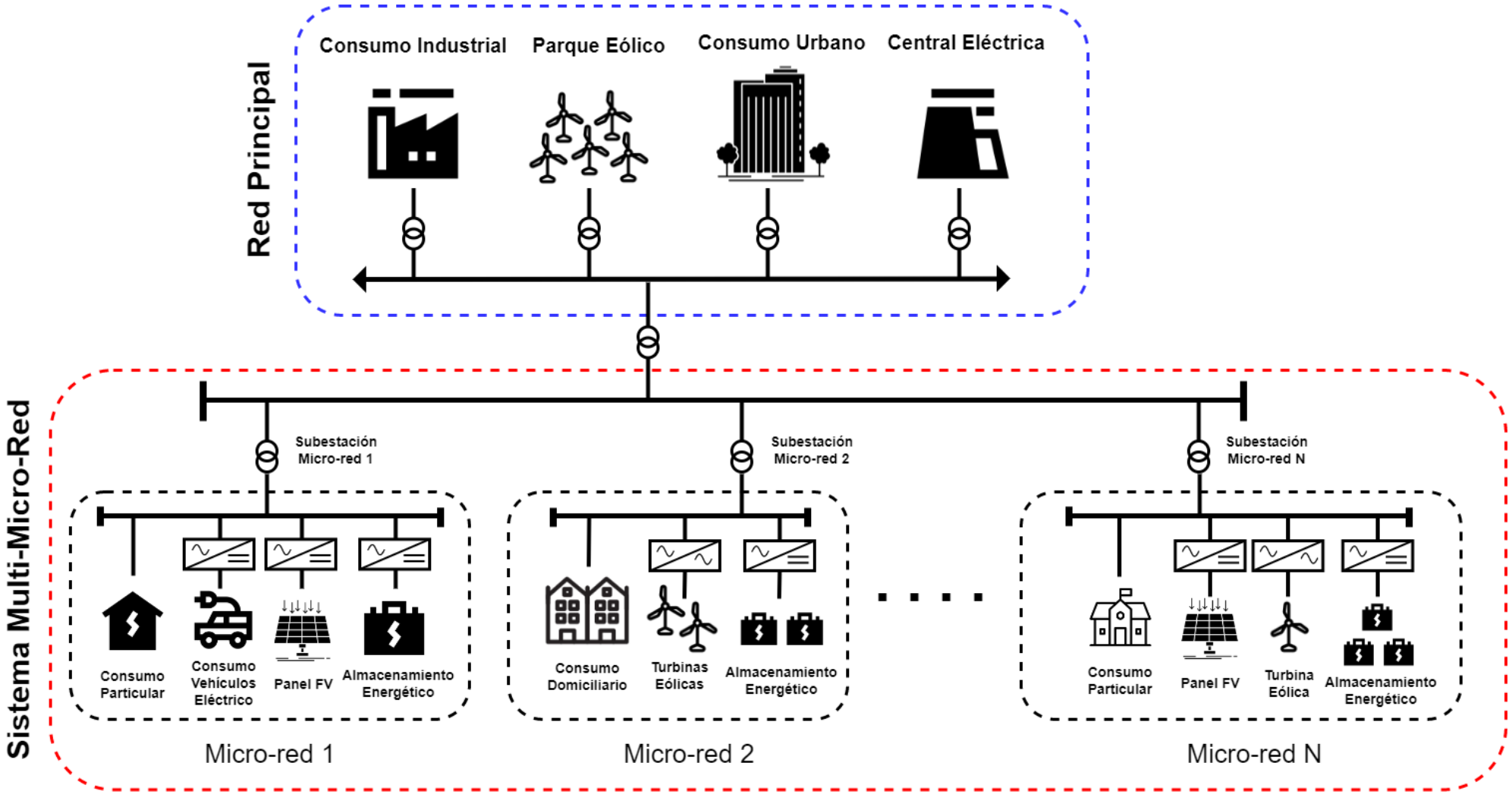
Venta de excedentes (AGPE/AGGE) y servicios de flexibilidad.

Los mismos activos (FV, BESS, inversores, EMS) atienden varios objetivos a la vez:
ahí está el caso de negocio.

Arquitectura funcional de una microrred



De la microrred a redes inteligentes



03 Operación y planeación de microrredes

Planeación y operación: distintas escalas de tiempo

PLANEACIÓN | **OPERACIÓN**

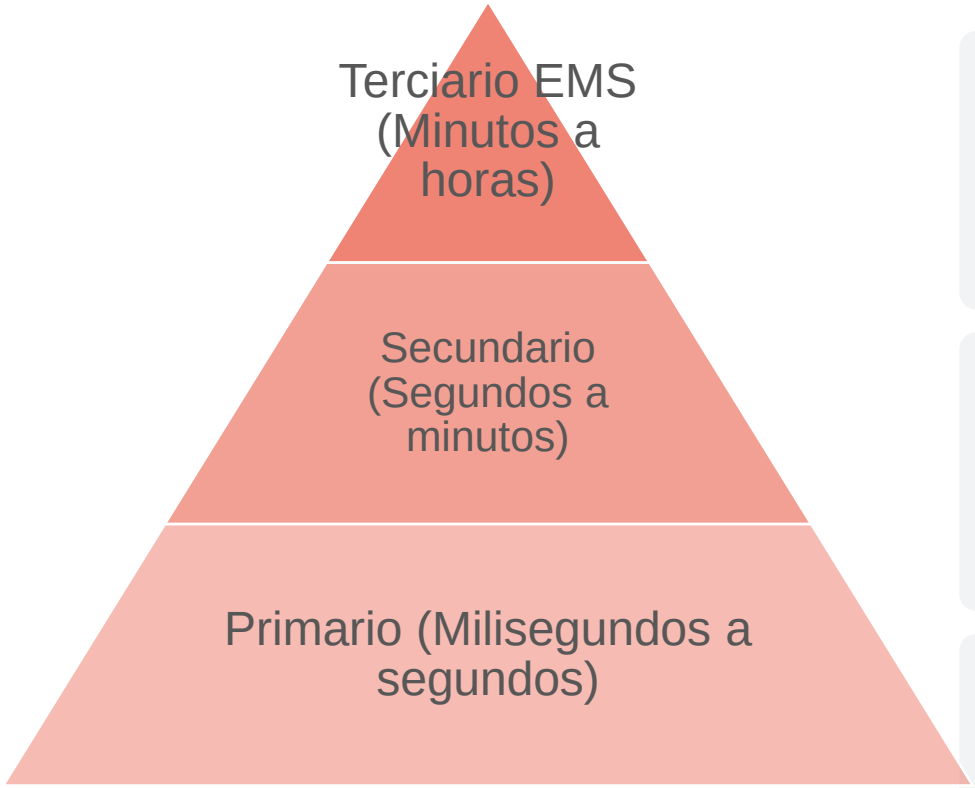
más rápido →



Años	Días – horas	Minutos	Segundos	Milisegundos
Planeación	**Programación**	**Control terciario (EMS)**	**Control secundario**	**Control primario**
Dimensionamiento, ubicación, mezcla tecnológica, viabilidad económica	Unit commitment y despacho económico con pronósticos	Ajuste de consignas en tiempo real, gestión del BESS	Restauración de frecuencia y tensión, sincronización	Droop, grid-forming, lazos internos del inversor

Una buena planeación incorpora la operación: dimensionar sin modelar el EMS y los servicios lleva a sobre- o sub-dimensionar el almacenamiento.

Control jerárquico de microrredes



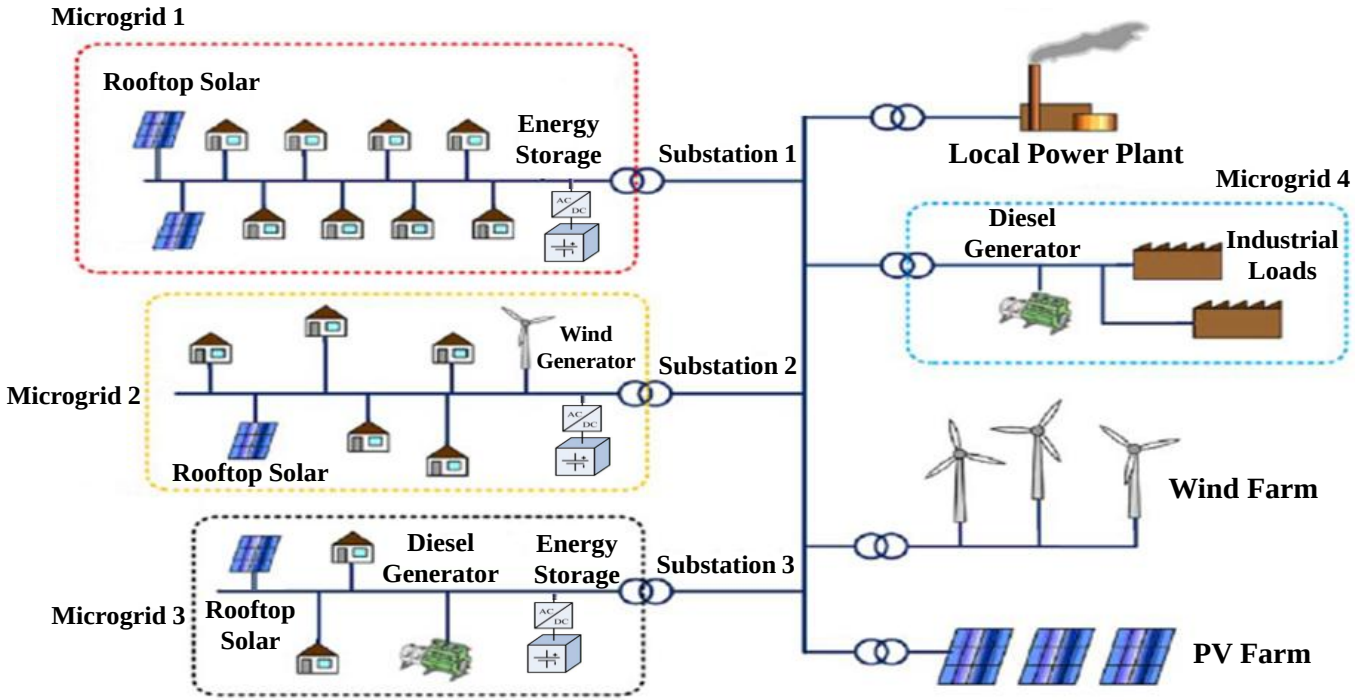
Optimiza costo, emisiones e intercambio con la red: despacho de DERs, gestión del BESS, compra/venta de energía, respuesta de la demanda. Usa pronósticos.

Restaura frecuencia y tensión a sus valores nominales tras la acción primaria y sincroniza la microrred para la reconexión.

Reparte la carga sin comunicación (droop P–f y Q–V), forma la red (grid-forming) y garantiza la estabilidad.

Nivel 0: lazos internos de corriente y tensión de cada inversor (microsegundos).

Sin gestión, la generación distribuida no es controlable



Tomada de: https://building-microgrid.lbl.gov/about-microgrids

Sistemas de gestión de la energía (EMS): Beneficios para el usuario final y el operador de red.



EMS por reglas vs. por optimización: un ejemplo sencillo

EMS por reglas (máximo autoconsumo)

- **Excedente FV:** carga la batería; si está llena, exporta
- **Déficit:** descarga la batería; si está vacía, importa de la red
- **Decide instante a instante,** sin mirar precios ni pronósticos

EMS por optimización (programación lineal)

$$J = \min_{\{P_{mgref}(k), P_{mgref}(k+1), \ldots, P_{mgref}(k+N_p-1)\}} \sum_{j=0}^{N_p-1} \underbrace{C(k+j) P_{mgref}(k+j)\, T_s}_{\text{Energy Consumption Cost}}$$

subject to:

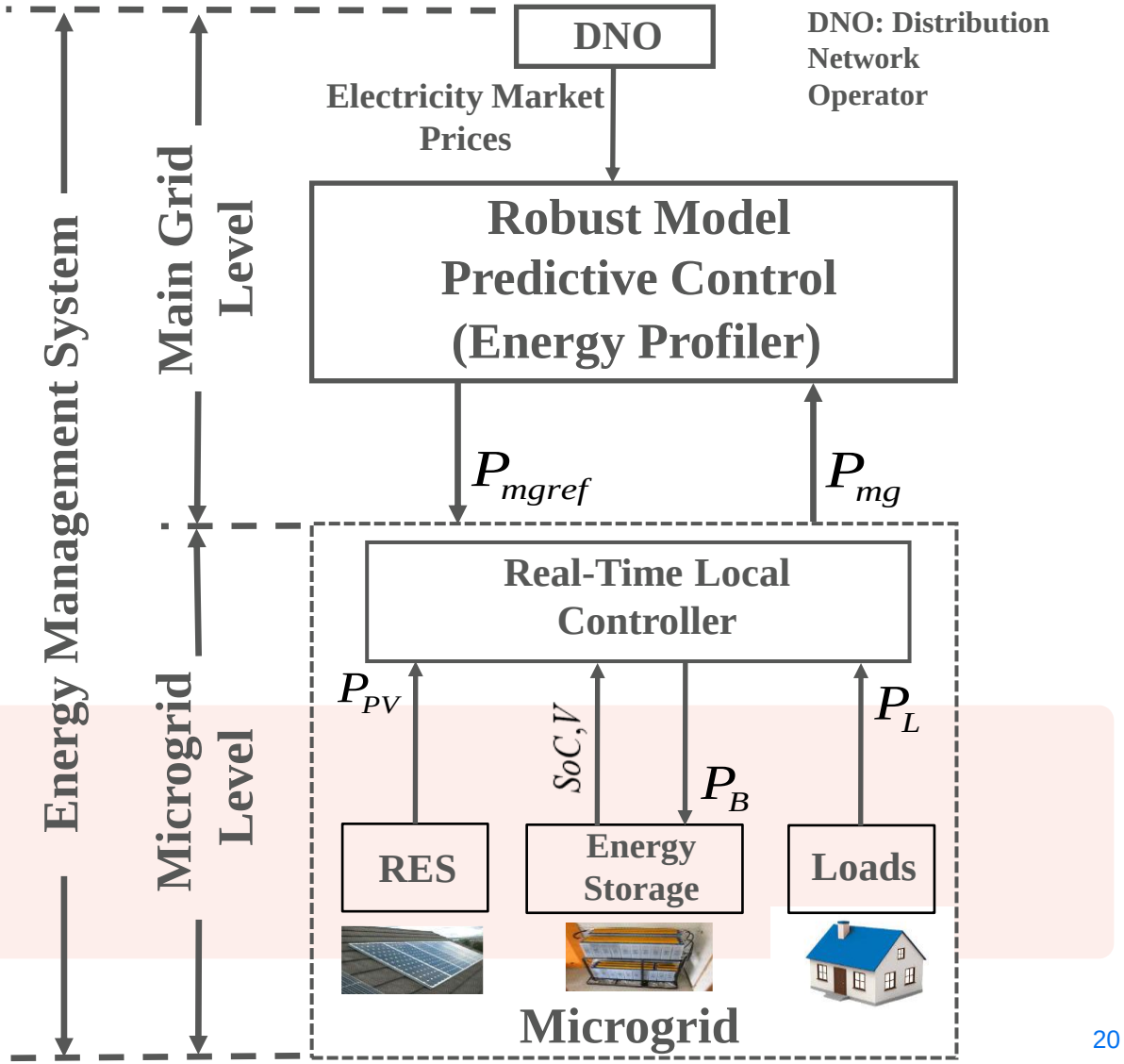
$$P_{mgref}(k+j) = \hat{P}_{net}(k+j) - P_B(k+j) \quad \text{Power Balance}$$

$$P_{mgref}^{\min} \le P_{mgref}(k+j) \le P_{mgref}^{\max} \quad \text{Grid Power Limits}$$

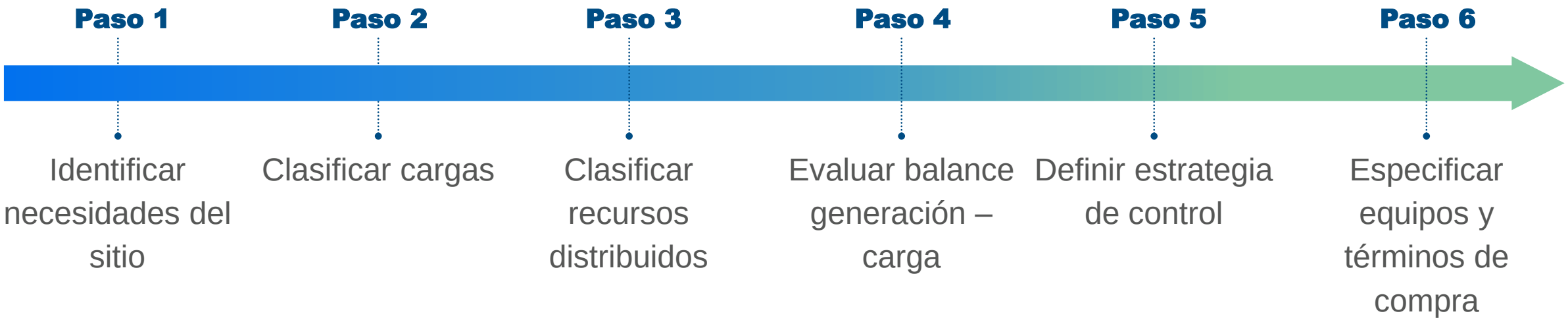
$$E_B(k+j+1) = E_B(k+j) - TsP_B(k+j) \quad \text{Evolution ESS}$$

$$E_{\min} \le E_B(k+j) \le E_{\max} \quad \text{ESS Capacity Limits}$$

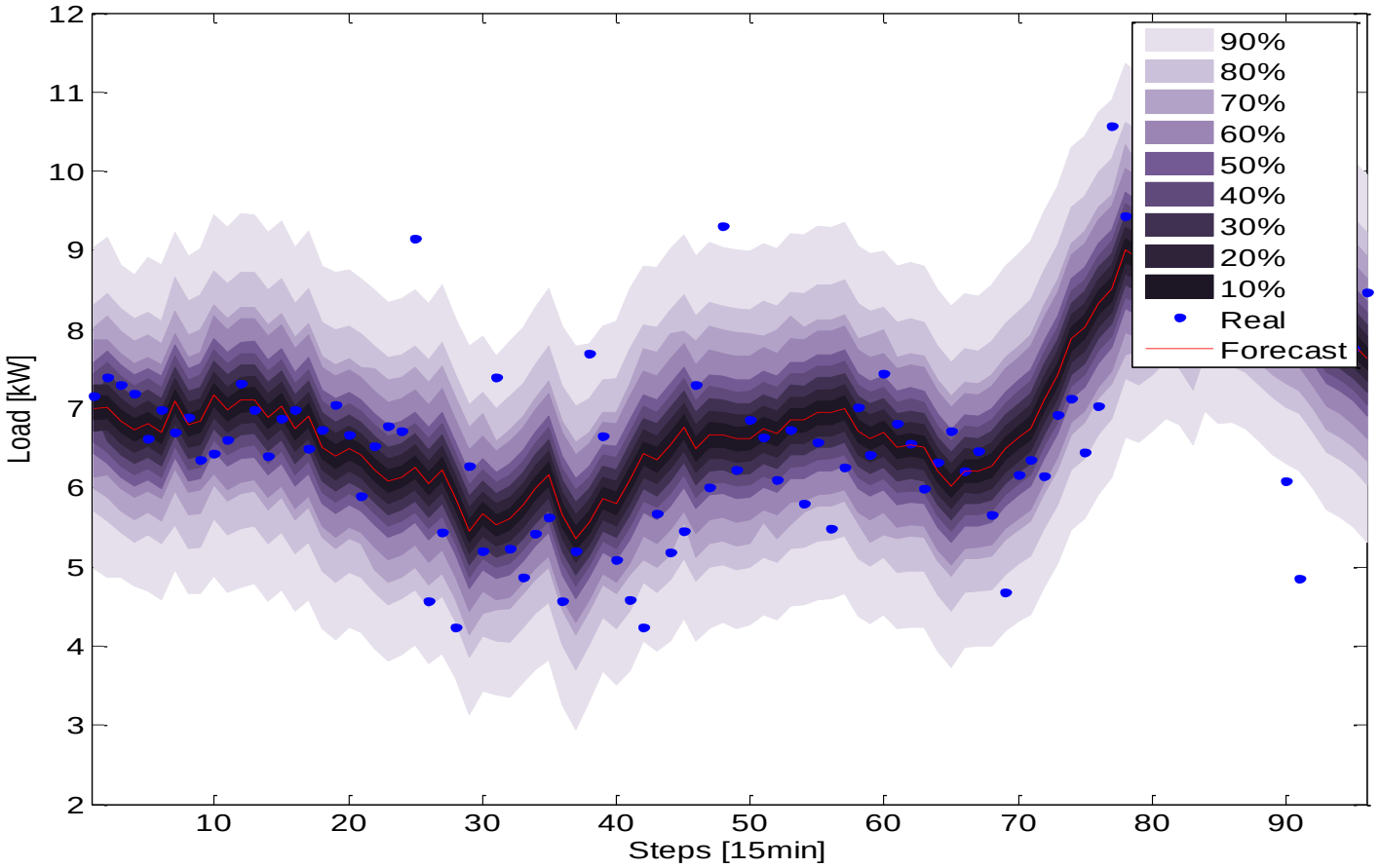
$$-P_{\max}^{chg}(k+j) \le P_B(k+j) \le P_{\max}^{dischg}(k+j) \quad \text{Charging and discharging ESS Limits}$$



Metodología de planeación en seis pasos



Modelar la incertidumbre: intervalos de predicción



$$\hat{y}_L(k) \leq g(Z(k), w) \leq \hat{y}_U(k)$$

Diseño y costos por escenario

Microgrid design, associated costs and operation under different scenarios.

Configuration	Unit	Worst-case	Bad-case	Baseline	Good-case	Best-case
Wind turbine of 10 [kW]	[units]	0	0	0	1	1
Photovoltaic array	[kWp]	111.0	92.8	89.7	63.1	38.6
Solar inverter	[kW]	40.0	30.0	30.0	20.0	18.0
Battery bank	[kWh]	162.4	144.3	139.8	117.3	85.7
Battery inverter	[kW]	23.2	20.1	20.4	15.6	13.9
Genset	[kW]	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
Costs	**Unit**	**Worst-case**	**Bad-case**	**Baseline**	**Good-case**	**Best-case**
Net Present Cost	[USD]	$476,212	$433,575	$417,734	$391,240	$336,241
Initial investment	[USD]	$333,914	$296,491	$290,407	$280,069	$229,262
Operating costs	[USD/year]	$12,406	$11,952	$11,101	$9,780	$9,327
Energy costs	[USD/kWh]	$0.491	$0.507	$0.516	$0,523	$0.514
Operation	**Unit**	**Worst-case**	**Bad-case**	**Baseline**	**Good-case**	**Best-case**
Fraction of NCRE	[%]	84.1	85.7	86.4	91,9	91.4
Fuel consumption	[lts/year]	3,768	3,672	3,269	1,822	1,671
Production of the gensets	[kWh/year]	10,977	9,627	9,560	5,286	4,887

04 Servicios complementarios desde las microrredes

Servicios complementarios: más allá del kWh

Servicios complementarios: servicios adicionales a la entrega de energía (kWh) necesarios para operar el sistema de forma **segura, estable y confiable**: regulación de frecuencia y tensión, reservas, arranque autónomo, calidad de potencia.

Antes: implícitos

- El generador síncrono central aportaba inercia, regulación de frecuencia y tensión, y corriente de cortocircuito
- Nadie los contrataba por separado: venían con la máquina

Ahora: explícitos

- DERs con inversores y control: inercia sintética, droop, Volt-VAR, grid-forming
- Se diseñan, se miden y pueden remunerarse

Una microrred con BESS e inversores inteligentes es, en sí misma, un proveedor de servicios complementarios.

Servicios que puede prestar una microrred

Regulación primaria de frecuencia

Droop P–f: responde en segundos al desbalance

BESS · grid-forming · generadores

Restauración de frecuencia

Control secundario / AGC: devuelve f a 60 Hz

EMS + BESS

Inercia sintética

Amortigua la caída inicial (RoCoF)

BESS · supercapacitores

Regulación de tensión

Curvas Volt-VAR (Q–V) y Volt-Watt

Inversores FV y BESS

Compensación de reactiva

Corrige el factor de potencia y evita penalizaciones

Inversores · STATCOM

Arbitraje de energía

Carga en horas valle, descarga en punta

BESS + EMS

Recorte de picos y congestión

Peak shaving y límite de exportación

BESS · cargas flexibles

Arranque autónomo e isla

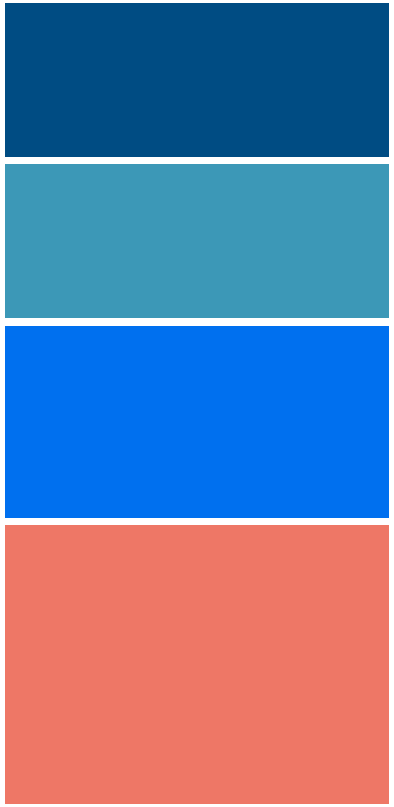
Black start y respaldo ante fallas

Grid-forming + BESS

■ **Frecuencia** ■ **Tensión y reactiva** ■ **Energía** ■ **Resiliencia**

El BESS como activo multiservicio y lo que dice hoy la regulación

Capacidad del BESS repartida entre servicios



Respaldo / isla
reserva de energía

Tensión y reactiva
margen del inversor

Regulación de frecuencia
reserva de potencia

Arbitraje y picos
energía

Esquema conceptual; las proporciones las define el EMS.

Colombia · Resolución CREG 101 113 de 2026

Incorporación de sistemas de almacenamiento con baterías (SAEB) al SIN

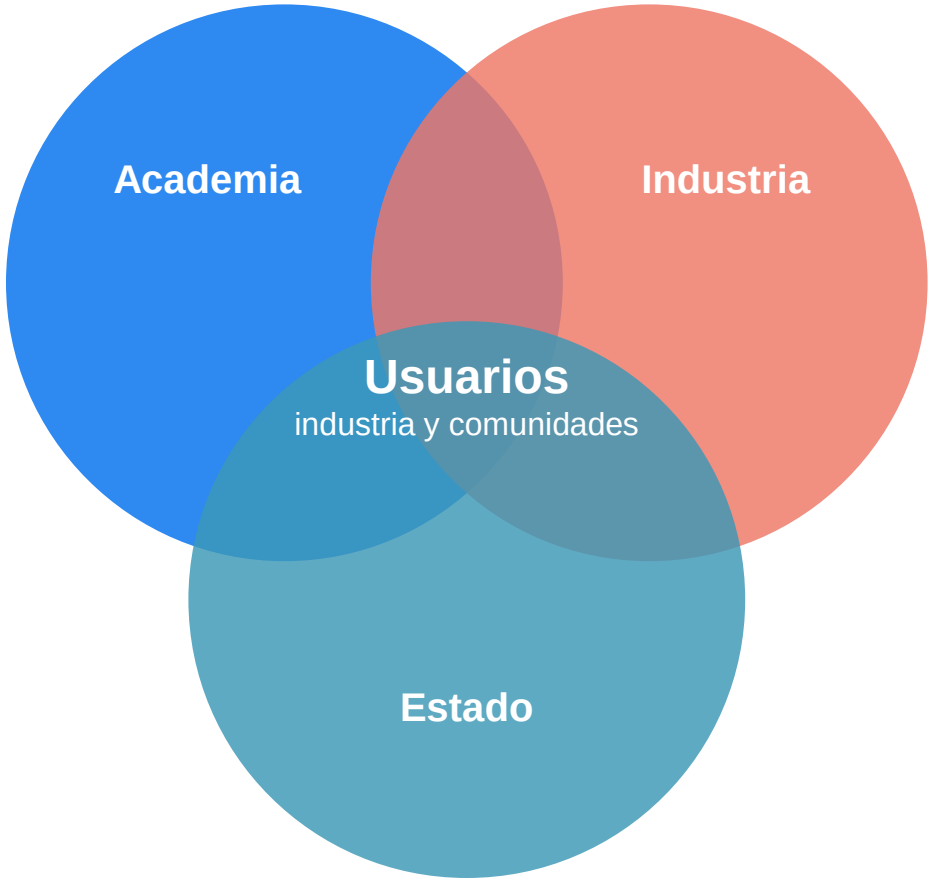
- **Como activos de red:** aplazar inversiones, mejorar tensión, frecuencia, inercia o cortocircuito, gestionar congestiones y sostener la frecuencia en zonas aisladas
- **Regulación primaria de frecuencia** obligatoria, en carga y descarga; AGC voluntario
- **Tecnología grid-forming** para sistemas de más de 1 MW
- **Baterías independientes ≥ 5 MW:** servicios en el mercado mayorista a través de un agente generador

Oportunidad: el mismo BESS que reduce la factura de la planta puede generar ingresos por servicios a medida que la regulación los reconozca en distribución.

Fuentes: CREG, Resolución 101 113 de 2026 (Diario Oficial 53.530, 22-jun-2026); Energía Estratégica, jun. 2026.

05 Academia + Industria: ruta para masificar microrredes

Un ecosistema para las microrredes: academia, industria y Estado



Academia · PUJ – CEPIT

Investigación aplicada (EMS, planeación con IA, control), formación de talento, laboratorios y transferencia.

Industria

Tecnología y equipos de prueba (emuladores de red, simuladores FV, cargas regenerativas, prueba de baterías), integración y soporte.

Estado · MinEnergía, CREG, UPME, Minciencias

Reglas de juego (AGPE, comunidades energéticas, SAEB), incentivos y financiación de CTeI y pilotos.

El valor está en la intersección: problemas reales de la industria, resueltos con investigación y validados con equipos de clase industrial.

Del laboratorio al campo: la ruta de validación



Modelado y simulación

Optimización, IA, flujo de carga

Control-HIL

Controlador real + planta en tiempo real

Power-HIL y laboratorio

Emuladores de red, simuladores FV, cargas regenerativas

Piloto en sitio

Campus, planta industrial, ZNI

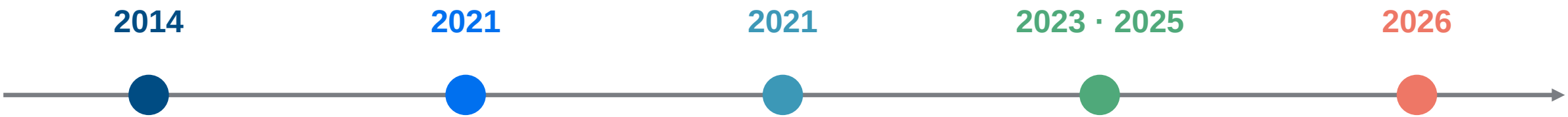
Escalamiento

Réplica, modelos de negocio, normalización

¿Qué se valida en laboratorio antes de llegar a planta?

- Funciones del inversor: Volt-VAR, anti-isla (IEEE 1547 / UL 1741)
- Algoritmos de EMS con perfiles reales de carga y FV
- Transiciones conectado ↔ isla y resincronización
- Servicios de frecuencia y tensión ante eventos de red emulados

Colombia: un marco habilitante que avanza



Ley 1715

Integración de FNCER y gestión eficiente; incentivos tributarios

Ley 2099

Transición energética; amplía incentivos e incluye hidrógeno

CREG 174

Autogeneración AGPE / AGGE y generación distribuida

Decreto 2236 · CREG 101 072

Comunidades energéticas: autogeneración y GD colectiva

CREG 101 113

Almacenamiento con baterías (SAEB) en el SIN

Brecha principal: reglas para que DERs y microrredes en distribución presten y sean remuneradas por servicios complementarios y de flexibilidad (tensión, reactiva, congestión, respaldo). ***Los pilotos y las arenas regulatorias son el camino para generar esa evidencia.***

Hoja de ruta para masificar microrredes en Colombia

Brecha	Situación actual	Acción conjunta	Quién
Regulación	Servicios de DERs en distribución sin mecanismo de remuneración	Pilotos y arenas regulatorias que generen evidencia	**Academia · OR · CREG**
Talento humano	Pocos ingenieros formados en control, EMS y electrónica de potencia	Programas conjuntos, prácticas y formación con equipos industriales	**Academia · Industria**
Confianza tecnológica	Interoperabilidad y cumplimiento de normas sin verificar	Laboratorios de prueba y certificación con HIL y emuladores de red	**Industria · Academia**
Financiación y negocio	CAPEX alto y modelos de ingreso poco claros	Convocatorias de CTeI, FENOGE, agregación y comunidades energéticas	**Estado · Industria · Usuarios**
Datos y replicabilidad	Proyectos aislados, sin datos ni métodos replicables	Casos de estudio abiertos y metodologías de planeación replicables	**Academia · Usuarios**

Mensajes para llevar

Los DERs ya son parte del sistema: la pregunta no es si se integran, sino cómo se controlan.

La microrred convierte DERs dispersos en una entidad controlable, resiliente y con valor económico.

Planear y operar van juntos: la planeación debe incluir la incertidumbre, el EMS y los servicios que prestará.

Con BESS e inversores inteligentes la microrred presta frecuencia, tensión, reactiva y arbitraje; la regulación empieza a reconocerlo.

Masificar exige un ecosistema: academia que investiga y forma, industria que provee y valida, Estado que habilita.

Pontificia Universidad JAVERIANA Bogotá | Facultad de Ingeniería

| VIGILADA MINEDUCACIÓN |

10 Aniversario ExpoSolar Colombia 2026
Energía renovable, futuro imparable

¡Gracias! Preguntas y conversación

Dr. **Luis Gabriel Marín Collazos**

Grupo de investigación CEPIT

Sistemas de control, electrónica de potencia y gestión de la innovación tecnológica
Facultad de Ingeniería
Pontificia Universidad Javeriana Bogotá

En alianza con

I+D Electrónica

Chroma Systems Solutions

28 al 30 Octubre | Corferias Bogotá

El hub de los negocios de la Energía Solar para Latinoamérica y el Caribe