



Claves para garantizar la seguridad del suministro y de la operación del sistema eléctrico

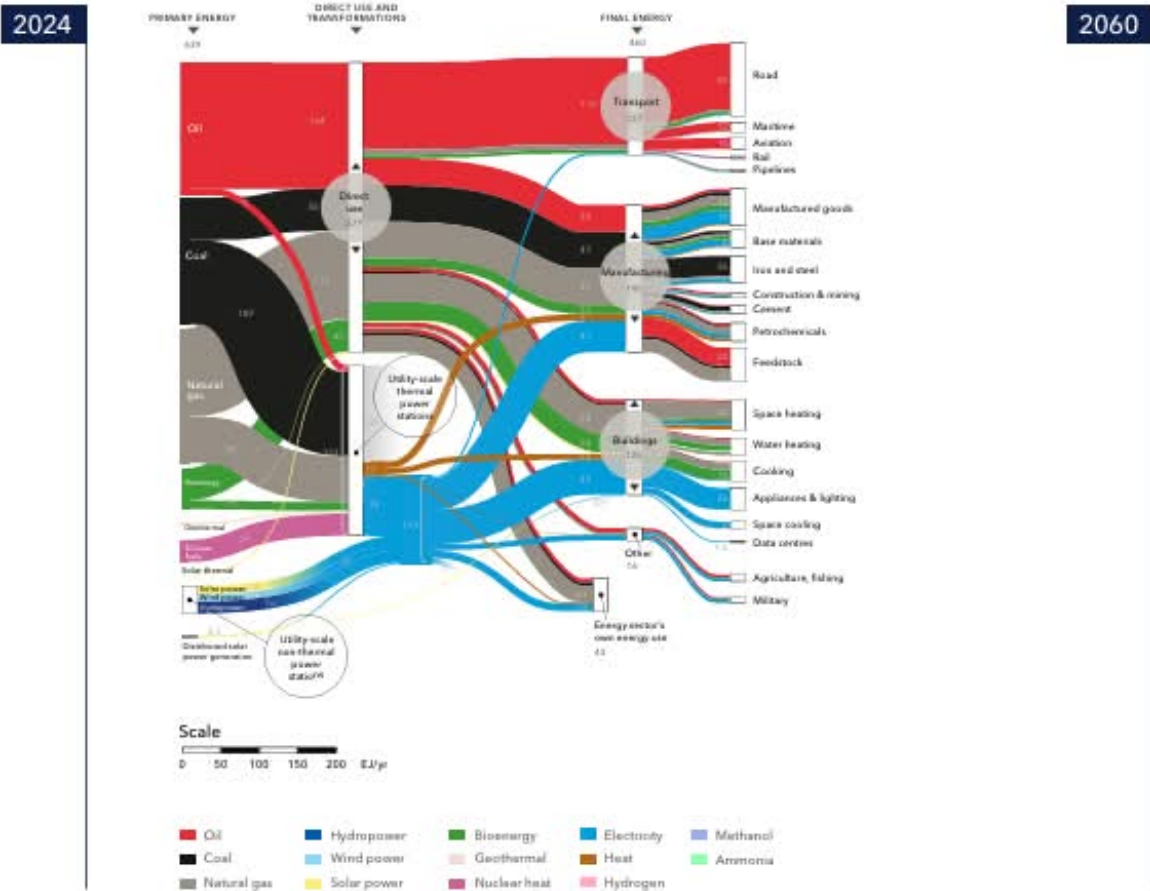
Angela Inés Cadena Monroy

Agenda

- Perspectivas de la canasta energética: RNW + EE (DNV, 2025). Electrificación (con nuevas arquitecturas y agentes).
- Algunas anotaciones iniciales.
 - Objetivos de políticas vigentes (Trilemma energético(WEC)).
 - Transición energética (orientada por la descarbonización).
Particularidades en puntos de arranque y de llegada, en el timing.
- **Hechos y retos. Mayores incertidumbres. Necesidad de adaptación vs. Trayectorias robustas.**
- **Preocupaciones por la seguridad del suministro y de la operación.**
 - Estudio CREE – ISA; Artículos sobre eventos recientes y posibles en Europa; Tesis M. Caro, 2025; XM (Estudios de flexibilidad y resiliencia).
- Algunas anotaciones finales
 - Vigencia de los mercados (revisados y actualizados). Nuevas arquitecturas y formas de transar.
 - Mejor coordinación de políticas y regulación / supervisión con un marco institucional fuerte, liviano y que permita la innovación.

Canastas energéticas 2024 – 2060 (global)

Comparison of energy flows



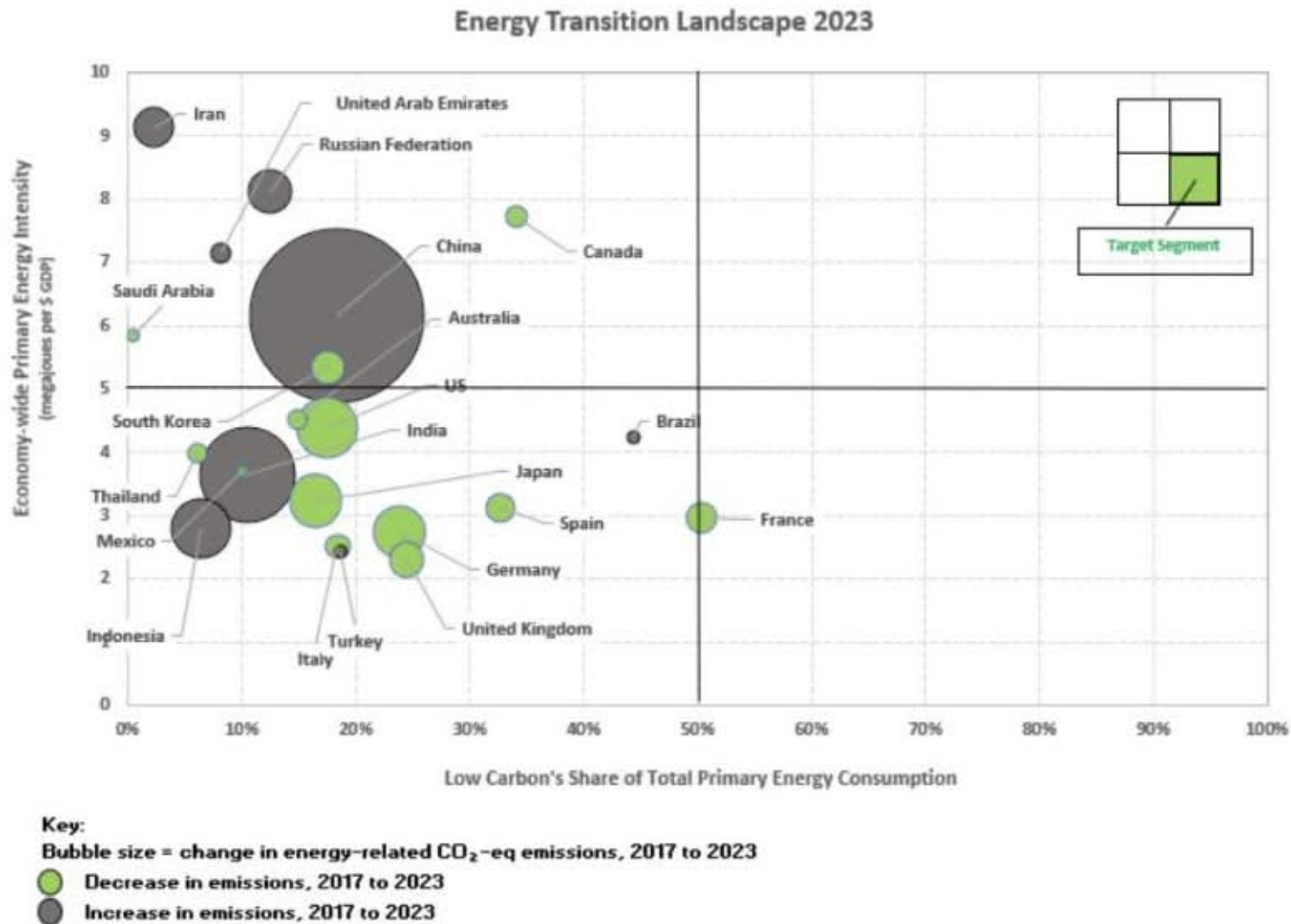
Fuente: DNV. 2025. Energy Transition Outlook
2024 - 2060

Aspectos a señalar

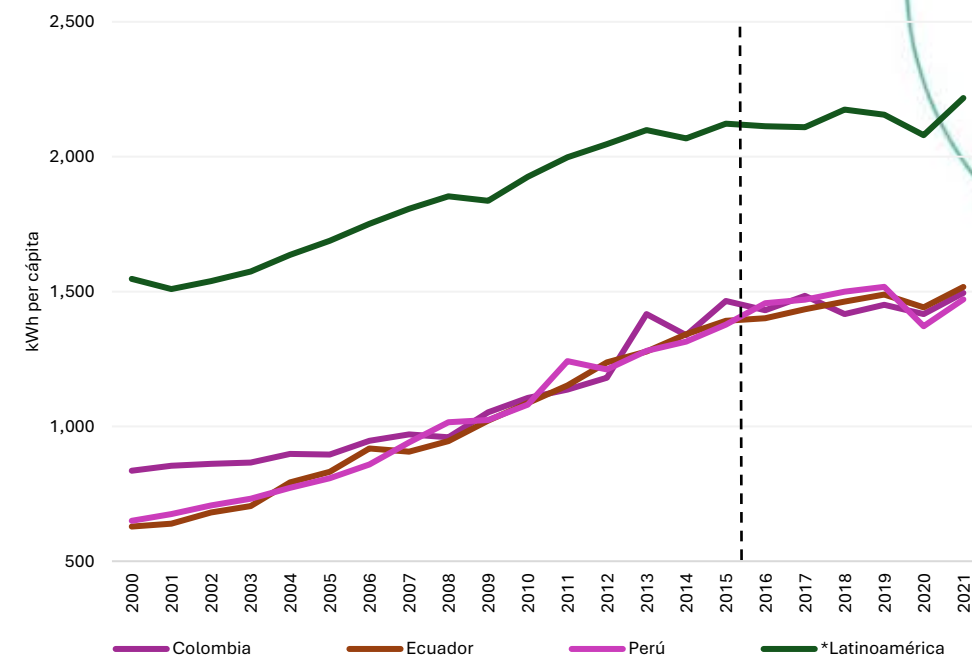
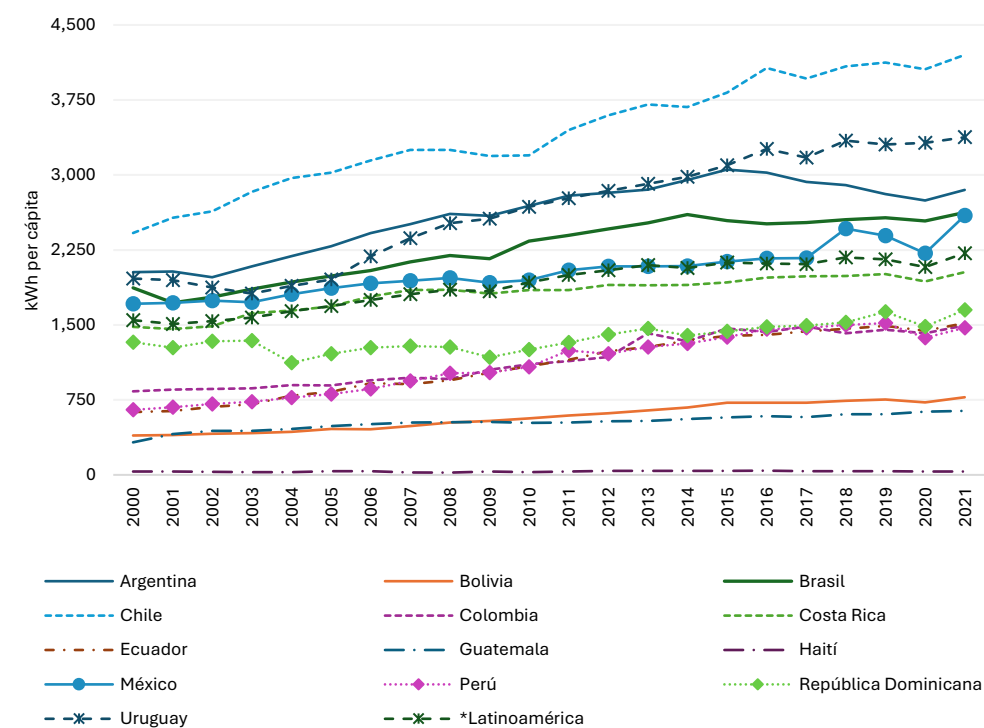
- Los análisis de prospectiva energética global (2024 – 2060) muestran que, a pesar de un crecimiento esperado importante de la demanda de energía útil, la energía final crecerá muy poco en las próximas décadas.
 - La energía final crece un 10% (de 460 EJ a 503 EJ) mientras que la útil crece un 45% (de 277 EJ a 401 EJ) en el periodo de análisis. Al finalizar estos años la economía se doblaría.
 - La eficiencia global del uso final de energía pasa del 60% al 80% en el periodo de análisis. Las mayores ganancias en eficiencia se dan en el sector transporte.
- Se evidencia la electrificación de la canasta energética, basada en un alto porcentaje en fuentes de energía variable. Pasará de ser el 18% de la canasta energética global en 2024 al 43% en 2060.
 - 2/3 de la generación será con tecnologías no térmicas y 1/3 con térmicas, mayoritariamente nuclear.
- Los combustibles fósiles pasarán de aportar el 78% en 2024 de la canasta global al 37% en 2060.



Renovables y reducción de emisiones



(Bajos) Consumos de energía per cápita (*)



Fuente: UPME. 2023. Cambios en el consumo de energía / Impacto de la participación activa de la demanda. Evento Colombia Inteligente.

Índices de cobertura

Brasil
99,3%

Colombia
93,12%

Guatemala
91,74%

Perú
92,6%

- Mejorables con la tecnología de DERs.
- Requiere oferta integrada de servicios.
- Integración a los programas de Desarrollo rural que garanticen la sostenibilidad de la solución.

Hechos y retos energéticos (1)

1. Crecimientos finales dependientes de (importantes) ganancias en eficiencia (desacople entre el crecimiento económico y el energético) y de las preferencias de la sociedad.
2. Electrificación de los usos finales de la energía con mayor penetración de fuentes limpias en el suministro. Digitalización del sistema. Mayor participación de los consumidores.
- ❖ Las renovables (41%), la eficiencia energética (40%) y la electrificación de los servicios (13%) son las principales medidas hacia la descarbonización 2050 (IRENA, diferentes reportes).
3. ‘Transiciones’ energéticas en la búsqueda de una sociedad y sistema energético con menores intensidades de carbono. Preocupación por los efectos sobre sectores vulnerables.
4. Preocupación por los impactos ambientales del desarrollo (teorías de decrecimiento... mejor ver *Prosperity without growth* (T. Jackson. 2009)) y los efectos de medidas de mitigación, control, adaptación.

Hechos y retos energéticos (2)

5. **´Nuevas´ preocupaciones por la seguridad del suministro energético y eléctrico en particular. Altas inversiones e innovaciones requeridas.**
6. **Vigencia de los mercados (revisados y actualizados). Nuevas arquitecturas y formas de transar.**
7. **Mejor coordinación de políticas y regulación / supervisión con un marco institucional fuerte.**
8. **Consideraciones energéticas adicionales según cada país, región, jurisdicción.**



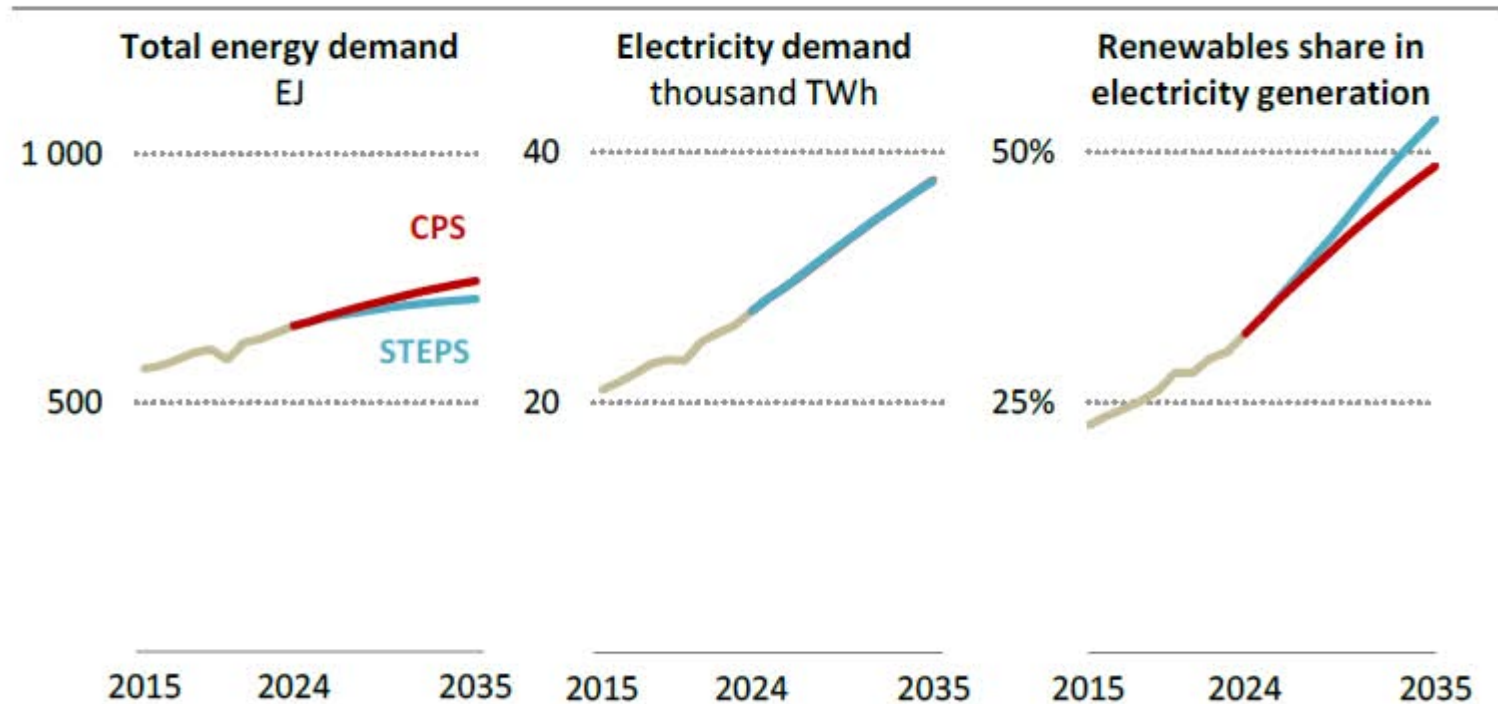
Seguridad del suministro y la operación

Flexibilidad y resiliencia para la prestación segura, confiable y eficiente.

Sistema con gran capacidad de adaptación y ‘no fragilidad’.

Canasta de generación eléctrica

Figure 1.1 ▶ Total energy demand, electricity demand, and renewables in electricity generation by scenario, 2015-2035



IEA. CC BY 4.0.

Operación del sistema - eventos

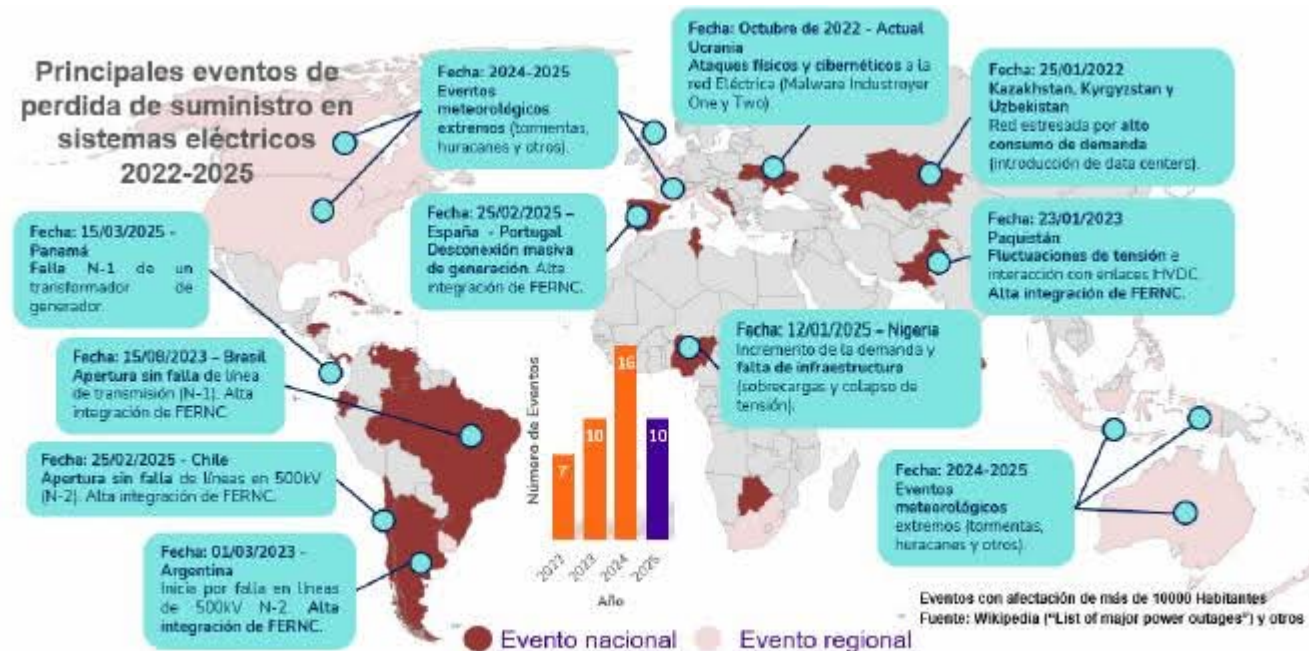


Figura 1 Eventos de pérdida de suministro eléctrico a nivel mundial

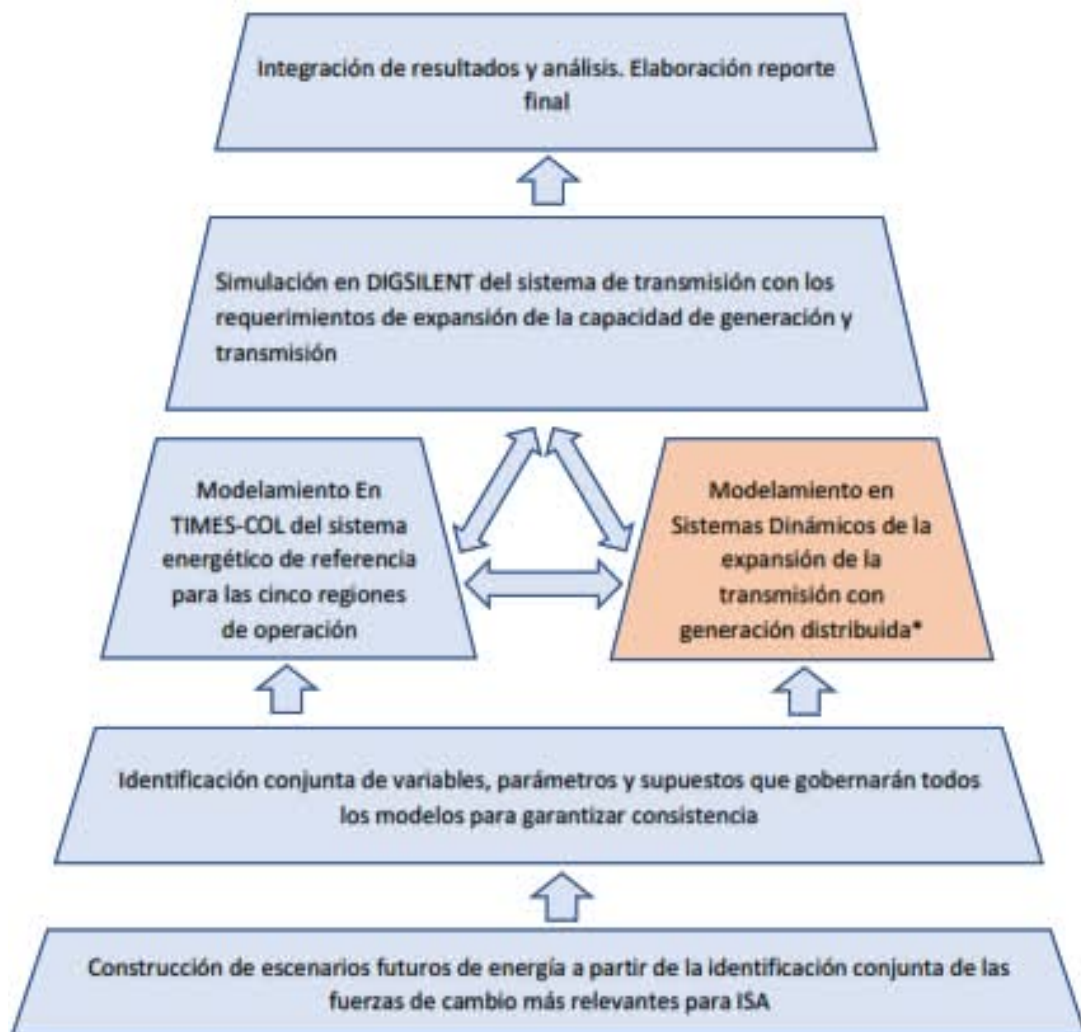
Fuente: XM. 2025.

- Es necesario garantizar la operación segura del sistema eléctrico en presencia de nuevas tecnologías y agentes, ante cualquier perturbación ‘interna’ o del entorno.

Aspectos del sistema eléctrico (1)

- Incorporación acelerada de fuentes variables, basadas en inversores (hasta ahora following grid). Reducción de los niveles de inercia tradicional. Falta de acumulación. Complementariedades no suficientes (a pesar de interconexiones).
- Sistema no preparado para estos despliegues y su funcionamiento: obsolescencia de la red, con posibilidades de demandas no atendidas crecientes.
- Despliegue de recursos distribuidos, entre ellos la gestión de la demanda. De Operadores de red a Operadores de Sistemas de Distribución.
- Nuevos agentes y tecnologías – facilidades de participación con restricciones de seguridad. Nuevos esquemas contractuales. Requerimientos de digitalización y manejo de información.
- Vigencia de los mercados, actualizados y reformados.

Suficiencia de la generación y la transmisión



Objetivo (CREE-ISA. 2024)

Construcción, modelamiento y análisis de escenarios de futuro energético que capturen la variación de las fuerzas de cambio más relevantes para ISA en la transmisión de la transición.

Estudio CREE – ISA. Transmisión para la transición (E3 – 2040)

Antioquia

Recurso	Generación MW		
	H3	H11	H18
Eólica	220,6	197,2	245,0
Gas natural	1410,2	-	2335,7
Geotermia	90,0	-	90,0
Hidro	4607,0	4607,0	4607,0
Hidro RoR	165,2	164,7	168,4
Hidrógeno	18,3	18,3	18,3
Nuclear	-	-	-
Solar	-	450,3	0,01
Solar Distribuido	-	984,7	0,01
TOTAL	6511,4	6422,2	7464,5
Demanda MW			
H3	H11	H18	
3715,07	4953,42	5188,71	

Caribe

Recurso	Generación MW		
	H3	H11	H18
Carbón	-	-	527,1
Eólica	5079,1	2482,3	5797,5
Gas natural	917,9	-	3180,2
Geotermia	90	90	90
Hidro	193,8	193,8	193,8
Hidrógeno	423,3	423,3	423,3
Líquidos	-	-	53,2
Solar	-	4808,6	-
Solar Distribuido	-	1748	-
TOTAL	6704,1	9746,0	10265,2
Demanda MW			
H3	H11	H18	
6196,71	8262,28	8654,74	

Nordeste

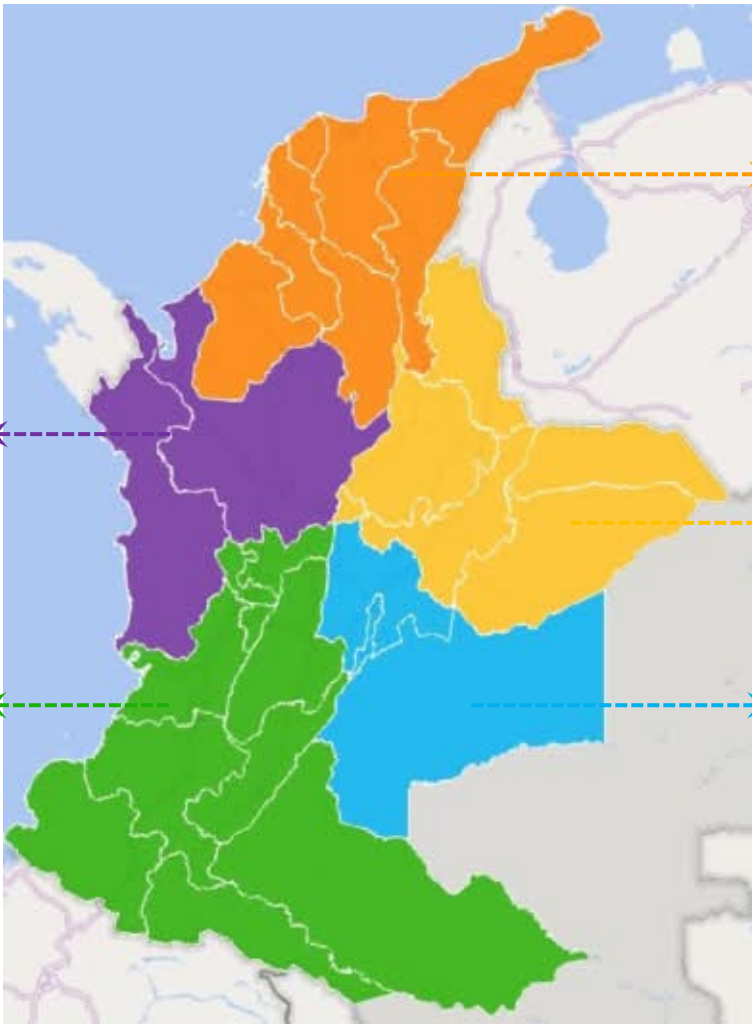
Recurso	Generación MW		
	H3	H11	H18
Carbón	-	-	609,3
Eólica	135,6	-	147,4
Gas natural	28,4	-	565,6
Geotermia	180	180	180
Hidro	1067,6	1067,6	1067,6
Hidro RoR	38,8	-	73,8
Hidrógeno	10,2	10,2	10,2
Solar	-	614,2	-
Solar Distribuido	-	393,9	-
TOTAL	1460,6	2265,9	2654,0
Demanda MW			
H3	H11	H18	
1555,34	2073,79	2172,29	

Oriental

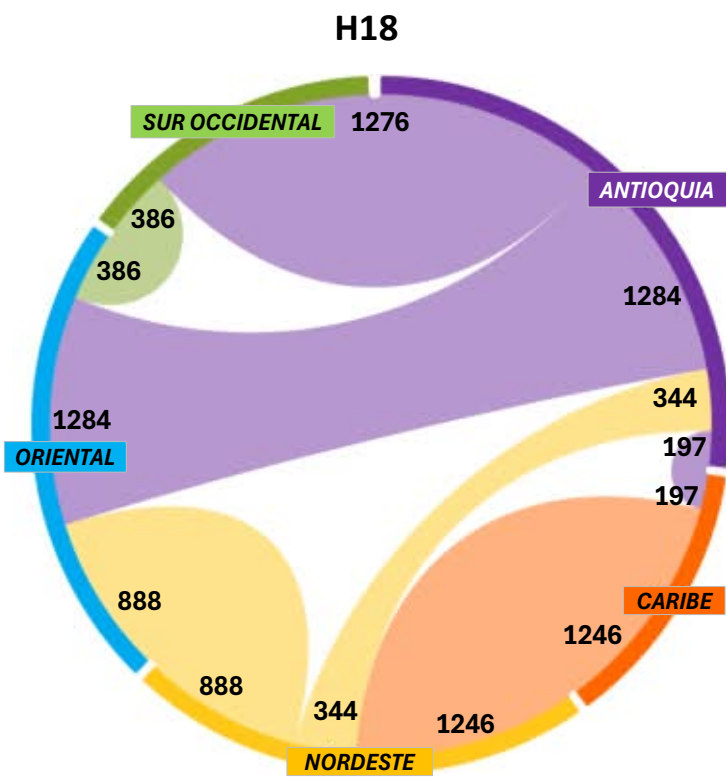
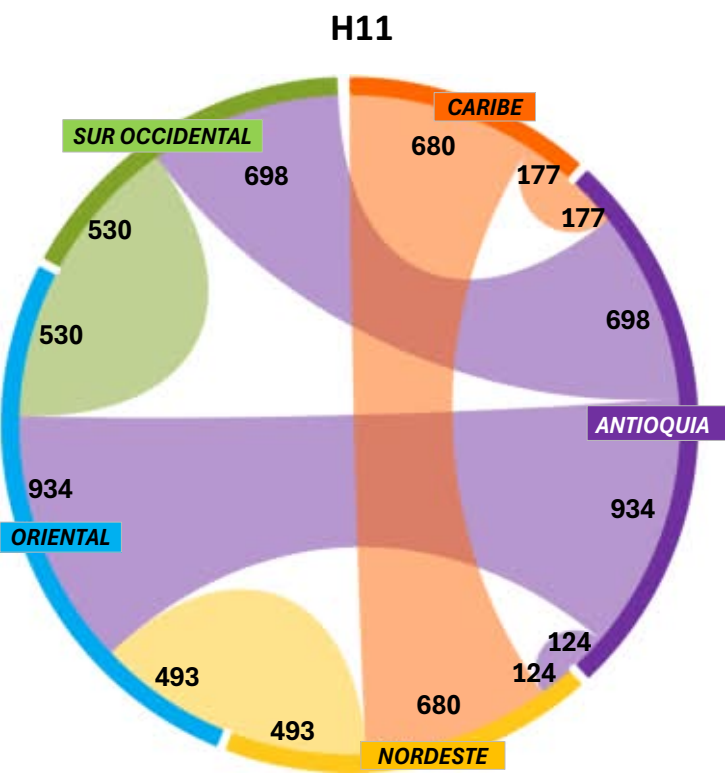
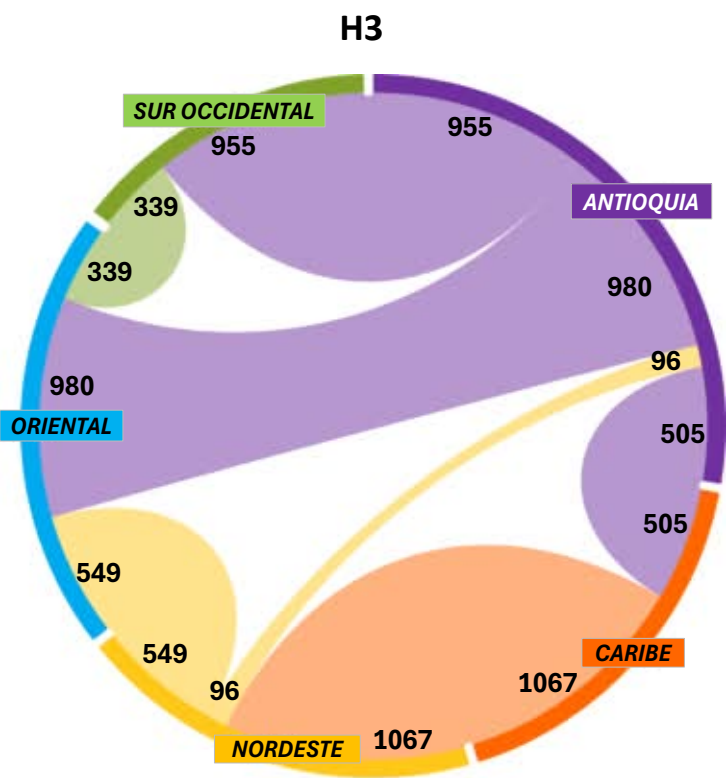
Recurso	Generación MW		
	H3	H11	H18
Biomasa	56,8	-	135,9
Carbón	-	-	281,4
Eólica	101,9	-	117,1
Gas natural	-	-	211,4
Geotermia	180	180	180
Hidro	1145,3	1145,3	1145,3
Hidro RoR	118,5	-	130,3
Hidrógeno	-	-	0,3
Solar	-	169,3	-
Solar Distribuido	-	1122,6	-
TOTAL	1602,5	2617,1	2201,6
Demanda MW			
H3	H11	H18	
4094,25	5458,99	5718,30	

Suroccidental

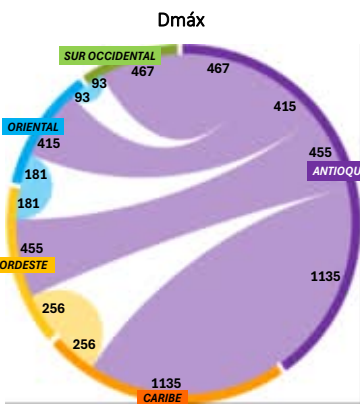
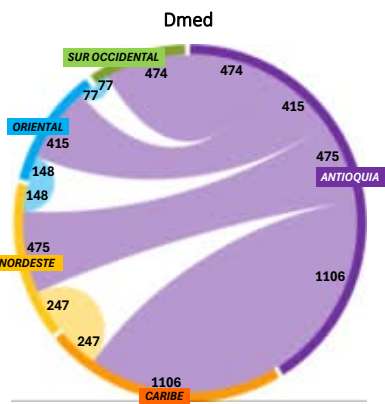
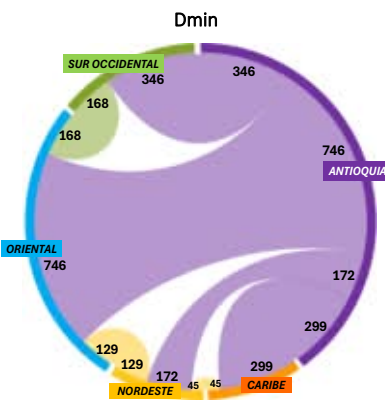
Recurso	Generación MW		
	H3	H11	H18
Biomasa	-	-	135,8
Carbón	-	-	247,5
Eólica	27,3	35,5	40,6
Eólica Offshore	70,5	-	82,6
Gas natural	-	-	296,4
Geotermia	450,0	-	450,0
Hidro	1443,5	1443,5	1443,5
Hidro RoR	136,1	181,8	222,5
Líquidos	-	-	202,3
Solar	-	1112,6	0,3
Solar Distribuido	-	608,4	0,1
TOTAL	2127,4	3381,8	3121,7
Demanda MW			
H3	H11	H18	
2844,38	3792,51	3972,65	



Intercambios de potencia Interáreas (MW) – E3 2040

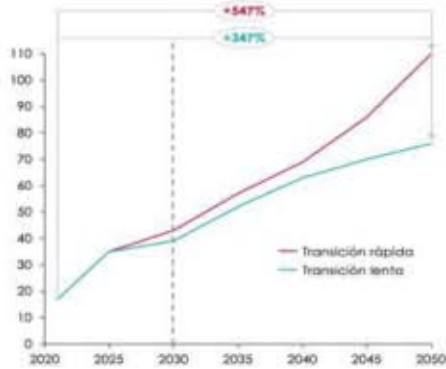


Condición actual de red - 2024

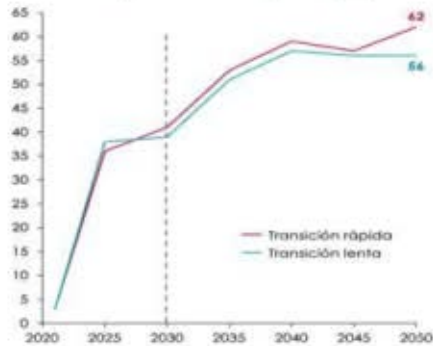


¿Qué tenemos que hacer?

Evolución capacidad instalada (GW)

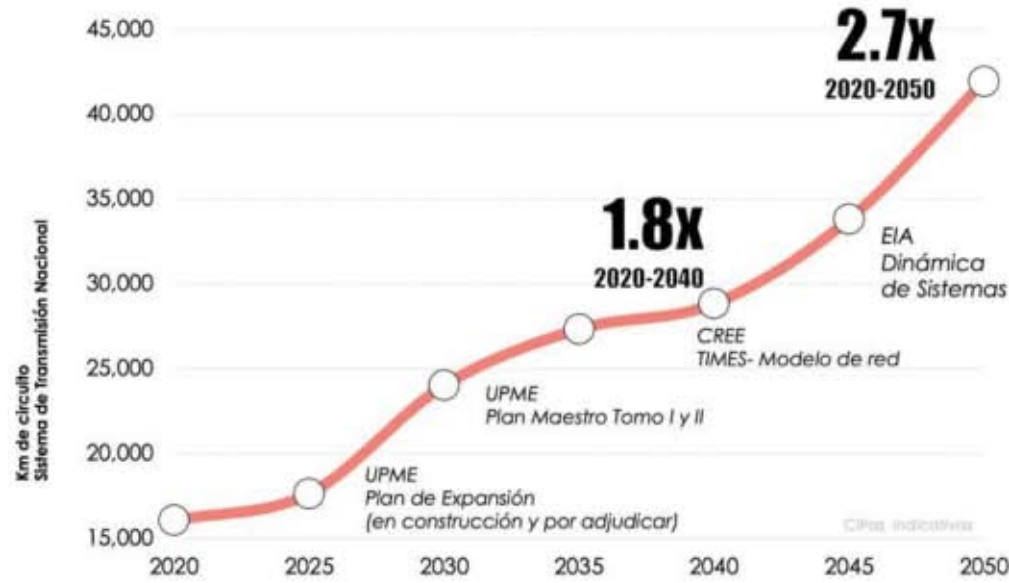


Participación eólica y solar (%)



CRE | CENTRO REGIONAL DE ESTUDIOS DE ENERGÍA

Necesidades de expansión del STN (Km)



VPN inversión: USD55-62 mil millones

Fuente: Modelación CREE, EIA, ISA

POR UNA COLOMBIA
EN CRECIMIENTO 2026-2045

10

- La generación descentralizada aporta cierto grado de autonomía regional. Se requiere incrementar la POTENCIA LOCALIZADA.

- En todos los escenarios hay grandes requerimientos de expansión de red con la complejidad de cambios en la dirección de los flujos de acuerdo con la disponibilidad de recursos (solares y eólicos) .
- Reconfiguración de Caribe desde sumidero a fuente.
- Oriental sigue siendo un sumidero
- Suroccidental y Nordeste son zonas de tránsito eléctrico.

Suministro de energía en dos direcciones

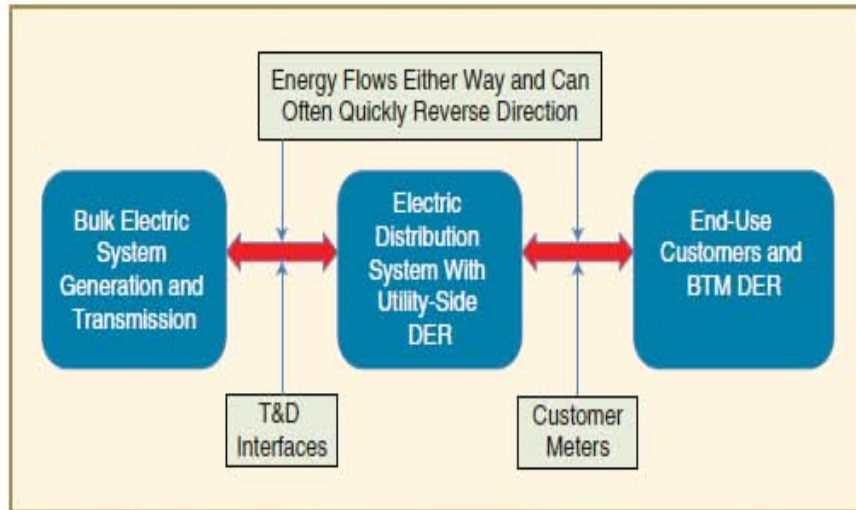


figure 2. The proliferation of DERs is overturning the one-way-flow paradigm.

Fuente: L. Kristov. The Bottom-Up (R)Evolution of the Electric Power System 2019. *IEEE power & energy magazine*.

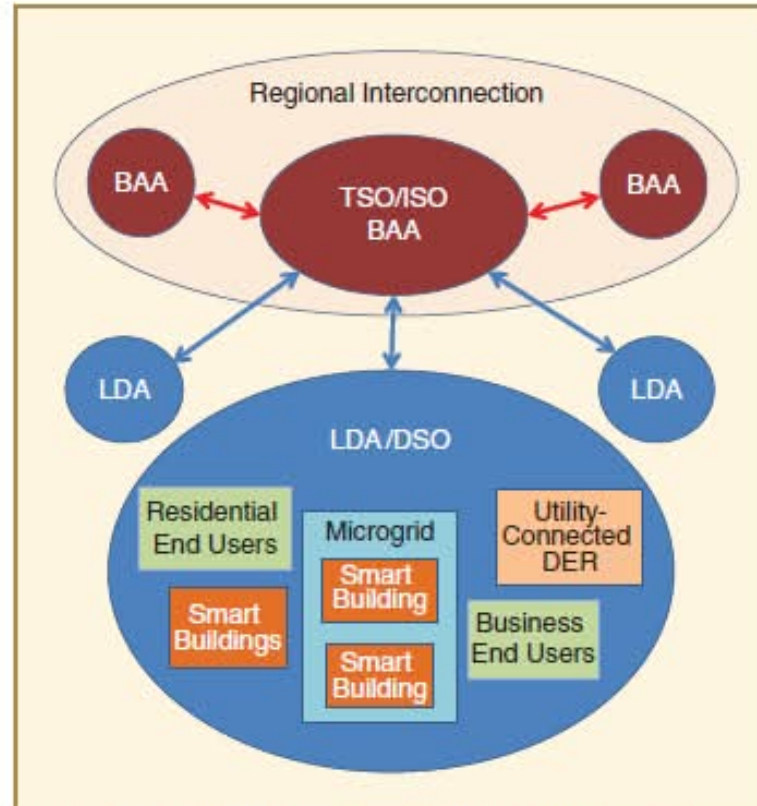
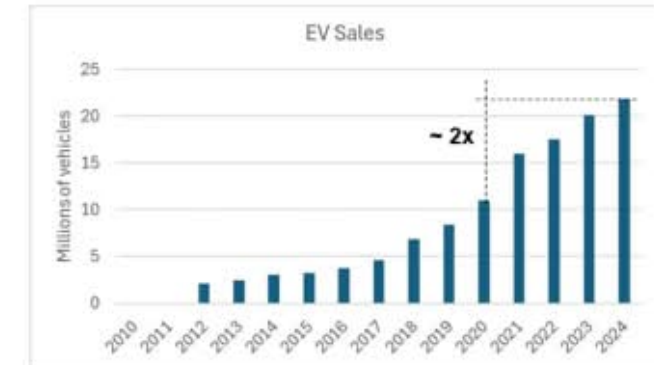
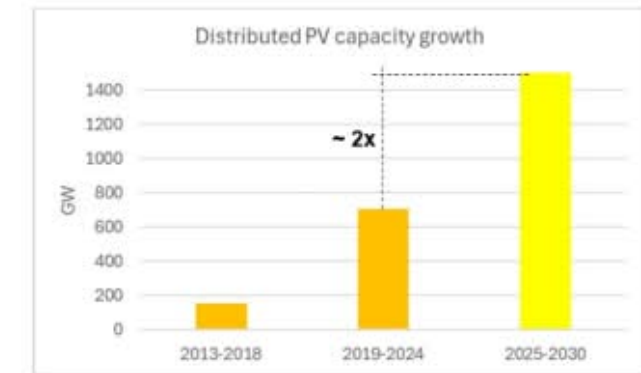


figure 1. The integrated-decentralized power system. BAA: balancing authority area; ISO: independent system operator; LDA: local distribution area.



EV include Cars, Vans, Buses, Trucks and 2 and 3 wheelers



Aspectos del sistema eléctrico (2)

- Sistemas híbridos AC – DC. Nuevos equipamientos de red. Necesidad de respuestas ‘naturales’ ante perturbaciones (inercia, aporte de corto circuito) y de acciones de control (control de frecuencia, voltaje, potencia reactiva).
- Planeación operativa ante incertidumbres fuertes y cambios súbitos.
- Otro paso hacia la Planeación integrada de recursos (energía, infraestructura) a diferentes niveles: G+T+equivalentes de D y operación de las expansiones para garantizar la suficiencia.
- Sistemas con respuesta lentas a los requerimientos: permisos, mayor involucramiento de la comunidad, curvas de aprendizaje.
- Importantes requerimientos de inversión que hay que habilitar y anticipar para garantizar la entrada a tiempo.

Seguridad de la operación

(Fuente: Fuente: Maurizio Titz et al. ‘Cascading Failures and Critical Infrastructures in Future Renewable European Power Systems’. <https://arxiv.org/abs/2603.24529>.)

- [Los] “hallazgos demuestran que la descarbonización no puede reducirse únicamente a una cuestión de tecnología de generación. Si bien el debate público suele centrarse en la expansión de la capacidad de energías renovables, **la configuración espacial de dicha expansión y la estructura de la red de transmisión determinan fundamentalmente la robustez del sistema**”.
- **“La transmisión no es simplemente una infraestructura facilitadora, sino un componente estructural de la seguridad del sistema, que influye en cómo evolucionan las perturbaciones y si las contingencias se convierten en apagones a gran escala”.**
- La generación, la transmisión y el control deben diseñarse conjuntamente, en lugar de tratarse como dimensiones independientes (bajo la sombra de las transiciones).
 - Diseñar un sistema eléctrico limpio, con bajas emisiones de carbono y resiliente, requiere una planificación integral que incluya la transmisión.
 - Las restricciones de estabilidad y las consideraciones de robustez deben incorporarse a la optimización y operación del sistema a largo plazo.

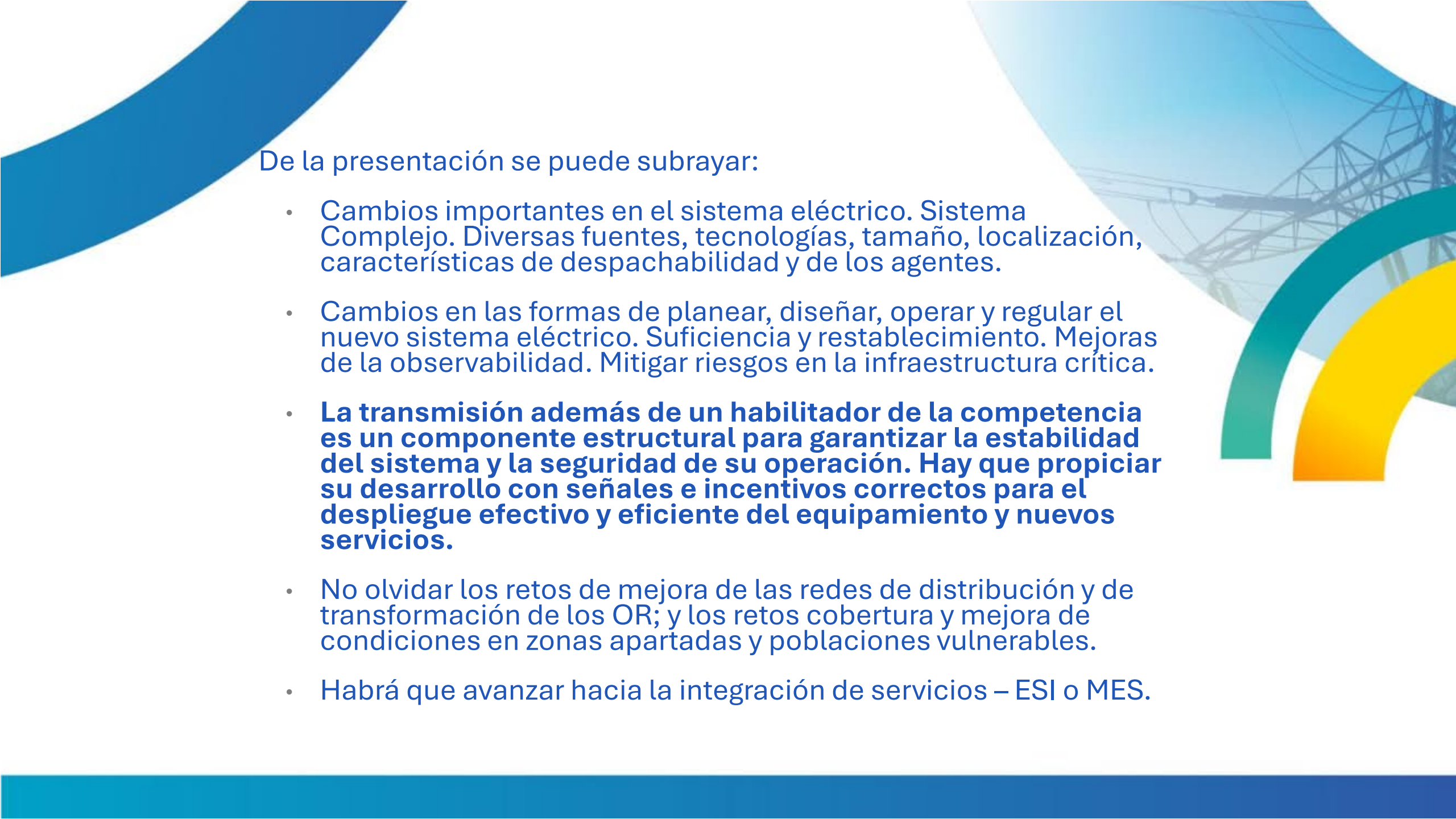
Consideraciones de resiliencia y flexibilidad

Fuentes: estudios de XM

- Suficiencia
 - Portafolio diversificado: energía firme, renovables + y complementariedades.
 - Estimación del recurso y mejores pronósticos de generación.
 - No siempre hay crecimiento positivo y sostenido cuando se supone equivocadamente una oferta estable y creciente de energías renovables.
 - Participación de la demanda: VPP y agregadores.
 - Reglas claras para jugadores de última instancia: requisitos técnicos de conexión, participación en servicios complementarios, aportes efectivos ante fallas, eventualmente requisitos de firmeza en la declaración de disponibilidad, limitaciones en las desviaciones en los pronósticos y requerimientos de supervisión y controlabilidad frente a condiciones que afecten el balance carga / generación.
- Capacidad de transporte
 - Además de eficiente y a tiempo (balance oportunidad /tarifas).
 - Abierta a todas las opciones de expansión.
 - Remuneración 'justa' y señales claras.
- Flexibilidad de potencia
 - Rampas
 - Desviaciones y desbalances
 - Reservas (AGC)
- Seguridad
 - Inercia, corto circuito
 - RoCoF, EDAC
 - Regulación primaria
 - Protecciones
 - Control de voltaje
 - Compensación local

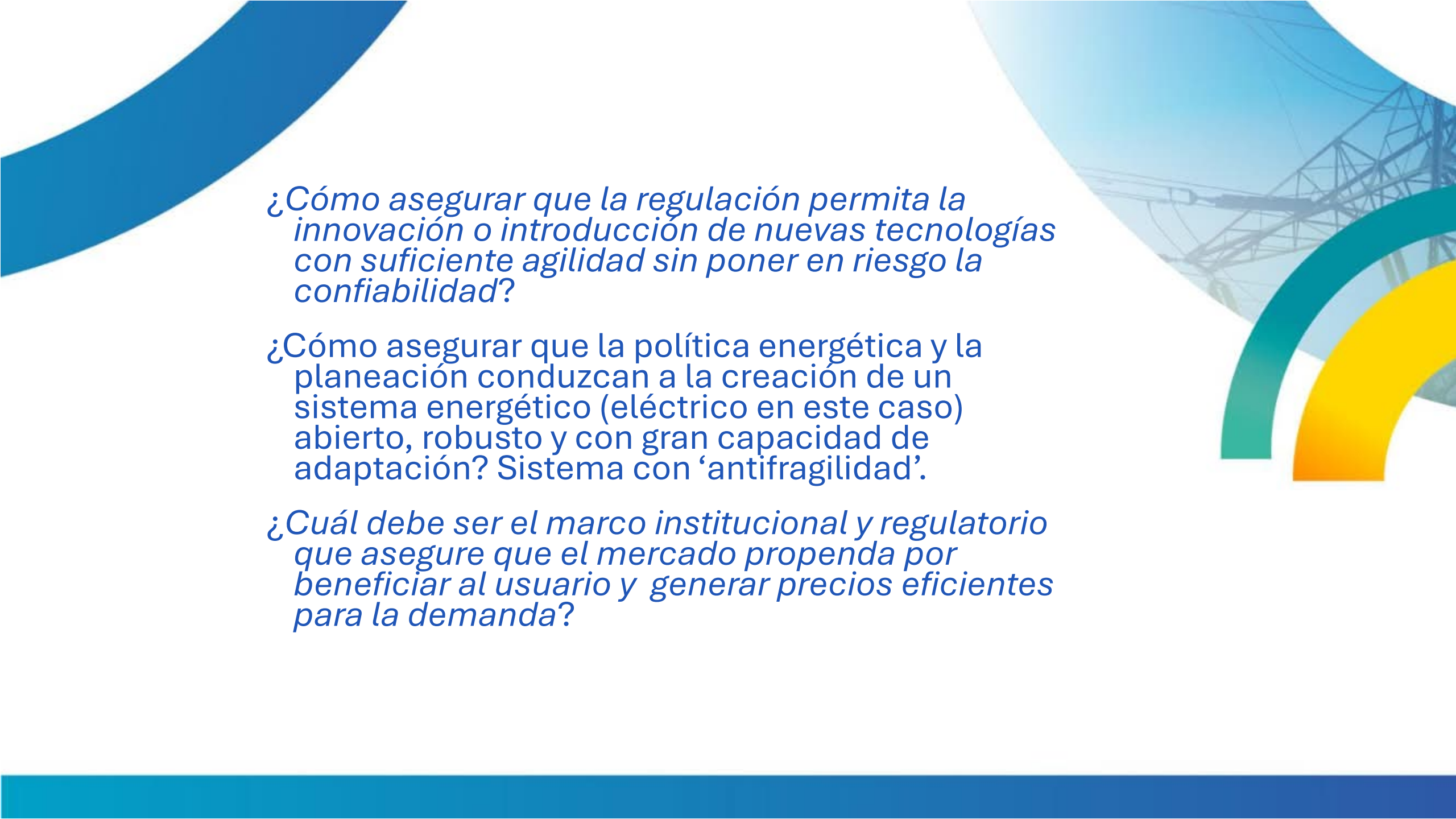
Inspirado en los estudios de:
Responsabilidad completa de la presentadora

Reflexiones finales



De la presentación se puede subrayar:

- Cambios importantes en el sistema eléctrico. Sistema Complejo. Diversas fuentes, tecnologías, tamaño, localización, características de despachabilidad y de los agentes.
- Cambios en las formas de planear, diseñar, operar y regular el nuevo sistema eléctrico. Suficiencia y restablecimiento. Mejoras de la observabilidad. Mitigar riesgos en la infraestructura crítica.
- **La transmisión además de un habilitador de la competencia es un componente estructural para garantizar la estabilidad del sistema y la seguridad de su operación. Hay que propiciar su desarrollo con señales e incentivos correctos para el despliegue efectivo y eficiente del equipamiento y nuevos servicios.**
- No olvidar los retos de mejora de las redes de distribución y de transformación de los OR; y los retos cobertura y mejora de condiciones en zonas apartadas y poblaciones vulnerables.
- Habrá que avanzar hacia la integración de servicios – ESI o MES.



¿Cómo asegurar que la regulación permita la innovación o introducción de nuevas tecnologías con suficiente agilidad sin poner en riesgo la confiabilidad?

¿Cómo asegurar que la política energética y la planeación conduzcan a la creación de un sistema energético (eléctrico en este caso) abierto, robusto y con gran capacidad de adaptación? Sistema con ‘antifragilidad’.

¿Cuál debe ser el marco institucional y regulatorio que asegure que el mercado propenda por beneficiar al usuario y generar precios eficientes para la demanda?

Angela Inés Cadena
¡Gracias!