

Reactores Modulares Pequeños (SMRs): Beneficios y Desafíos para su Implementación en Colombia

Dr. Louis Fernando Restrepo

PhD, MEng., MS., BS., CSE*, FPE*

Asesor Principal en Nuclear Safety**

Consultor del DOE/NNSA (Link Tech. Inc.)

Séptimo foro



* Ex (anteriormente)

** Safety (o safe) es diferente de seguridad en Ingles (p.ej., prevención o mitigación de consecuencias); en este sentido la palabra safety or safe se usara en esta presentación en vez se seguridad)

Agenda

- Condiciones que Comprometen la Capacidad de Suministrar Energía Eléctrica Confiable
- Solución Óptima ante estas Condiciones
- ¿Qué son los Reactores Modulares Pequeños (SMRs)?
- Diferencias entre los SMRs, Reactores Convencionales, y Microreactores
- Clases/Tipos de SMRs y sus Principales Características
- Países Implementando SMRs y su Estado de Implementación
- Beneficios Generales de los SMRs
- Principales Desafíos en la Implementación de SMRs
- Recomendaciones para su Implementación en Colombia

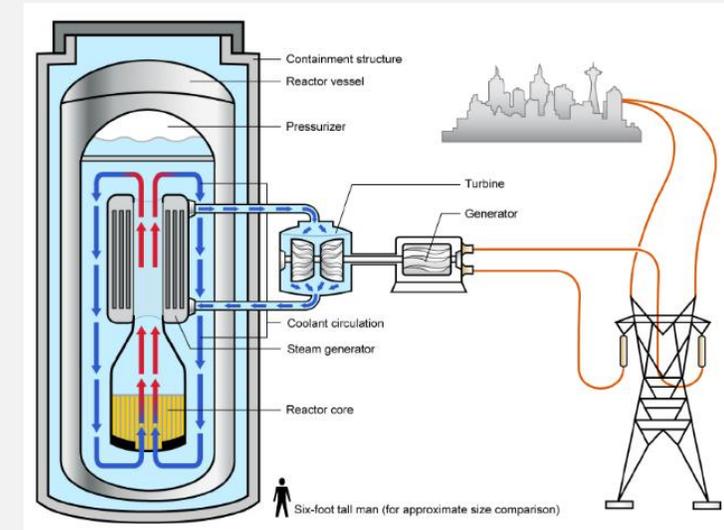
Condiciones que Comprometen la Entrega Confiable de Energía Eléctrica

- Crecimiento poblacional y necesidad de acceso a energía de la población existente
- Aumento de la base industrial (centros de datos, demanda de IA)
- Probabilidad de cambios climáticos más extremos (mayores sequías) que afectan la generación hidroeléctrica
- Necesidad urgente de descarbonizar la matriz energética
- Disponibilidad limitada de fuentes renovables (dependientes del clima)

¿Qué opciones tenemos?

- Características Deseadas
 - Fuente de energía base limpia y libre de carbono
 - Alta densidad energética (millones de veces mayor que el carbón)
 - Fuente confiable, eficaz, flexible y estable
 - Ayuda a mitigar el calentamiento global
 - Respaldo confiable para fuentes renovables
 - Impulsa el desarrollo económico
 - Menos riesgosa que otras fuentes de electricidad (fósil, eólica, solar)

- La respuesta lógica es energía nuclear (reactores convencionales)
 - Producen ~10% de la electricidad del mundo (370 GW capacity)*
 - Desplazan ~1.6 gigatons de emisión de carbón anualmente*
- **Pero específicamente los SMRs**
 - Fuente de generación de energía base limpia y libre de carbono
 - Densidad de energía alta** ~ 5×10^6 veces mayor que el carbón
 - Fuente de energía base confiable, eficaz, flexible y estable
 - Ayuda a mitigar el proceso de calentamiento global
 - Fuente ideal de respaldo confiable para las energías renovables
 - Menos riesgosa que otras fuentes de energía



* OECD Nuclear Energy Agency (NEA) SMR Dashboard 2024

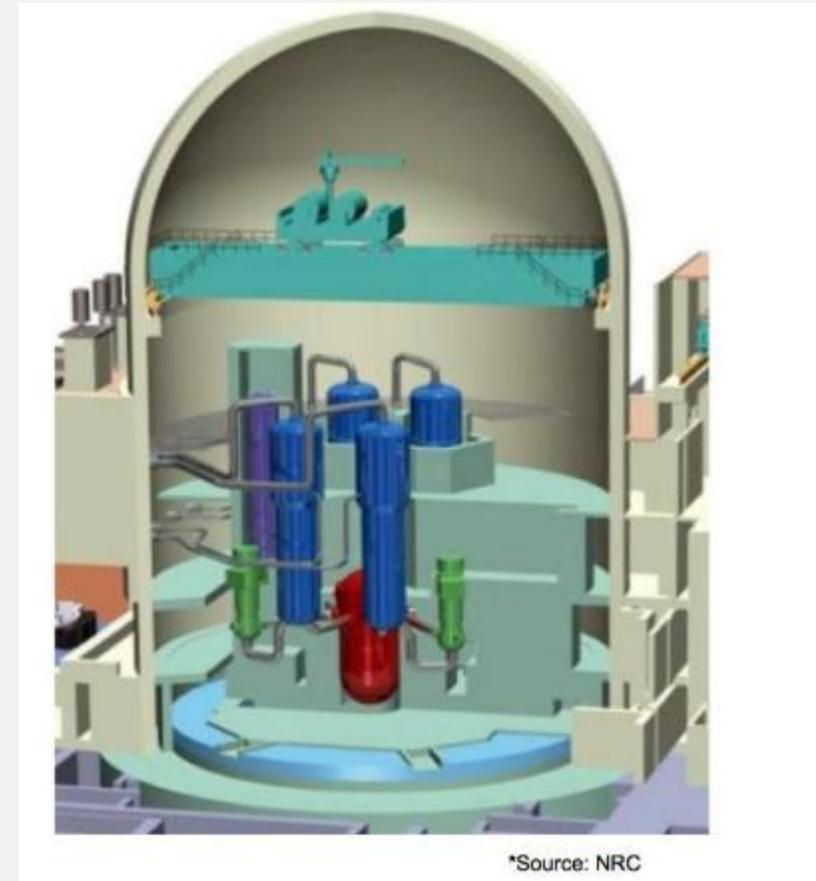
** Densidad de energía: U^{235} is ~ 140,000,000 MJ/Kg .vs. C^{12} ~ 25 MJ/kg

¿Qué tan Riesgosa es la Energía Nuclear?

Principalmente es una percepción pública más que hechos reales

Tasa de Mortalidad Global (muertes/trillon KWh)*

Carbón	100,000
Pretróleo	36,000
Gas Natural	4,000
Solar	400
Viento	150
Nuclear	90



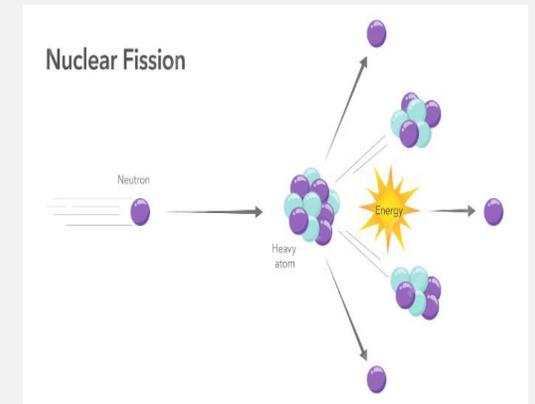
- Tally by Forbes Magazine
- Figura – Típico PWR

¿Qué son los SMRs?

- Pequeños reactores nucleares avanzados, con una capacidad <300 MWe
- Diseño modular (implementación escalable según la demanda de energía deseada)
- Incorporan tecnologías innovadoras que mejoran la safety, eficiencia y viabilidad económica
- Más safe y flexibles que los reactores convencionales
- Utilizan reacciones de **fisión nuclear** para generar calor y electricidad (a través de turbinas de vapor o de gas)

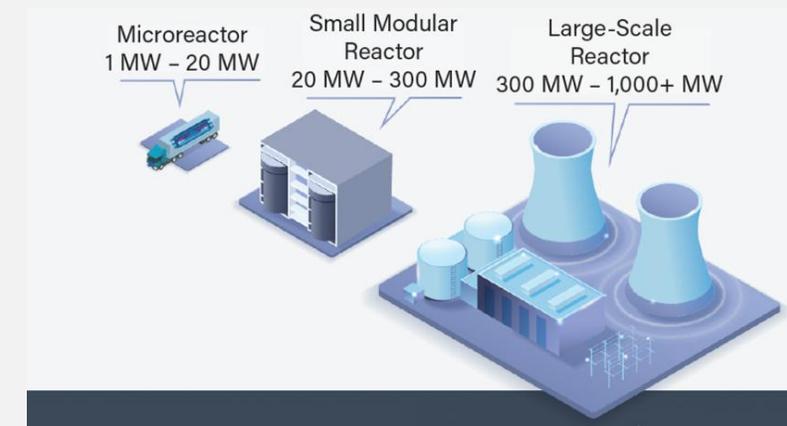
Interacción de neutrones con el núcleo de materiales **fisibles** (U^{238}), **fisionables** (U^{235}) o **fértiles** (Th^{232}) para mantener una **reacción en cadena** de fisión nuclear (división del núcleo, generación de calor, radiación y más neutrones en una reacción en cadena autosostenida)

El objetivo de SMRs es hacer que la energía eléctrica sea más accesible, safe, y rentable



Diferencias de SMRs con Reactores Convencionales y los Microreactores

- Reactores Convencionales (>1000 MWe)
 - Fijos, contruidos en el sitio, mayoría son LWRs*, crean gran huella, muy costoso, controvertidos
- SMRs (20-300 MWe)
 - Diseñados con altos estándares de safety pasiva
 - Requieren menor inversión inicial en comparación con reactores convencionales
 - Modular y portables - Se pueden construir en serie, reduciendo tiempos y costos de construcción
- Microreactores (1-20 MWe)
 - Lo mismo que SMRs (excepto, se implementan fuera de la red)
 - Bien adaptado para investigaciones y aplicaciones militares

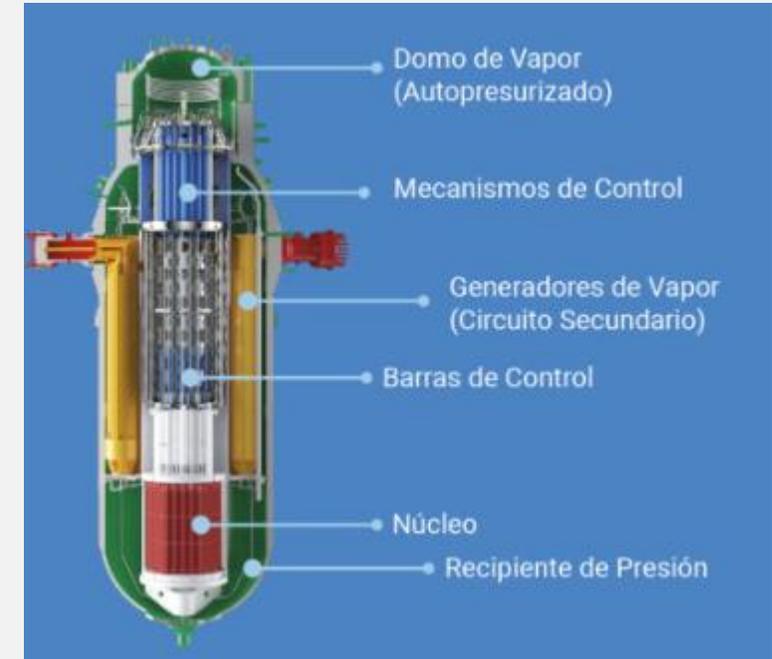


* LWR - Light Water Reactor – reactores de agua ligera

Clases/Tipos de SMRs y Características

- **Reactores GEN III+ (ALWRs* : PWRs/BWRs)**

- Tecnología madura y conocida
- Utilizan agua ligera como refrigerante y moderador
- Combustible de reactor con uranio de bajo enriquecimiento (<5% U²³⁵ - LEU)
 - ❖ Fijos - SMR de unidad única y multimódulo
 - ❖ Mviles – Embarcaciones marinas
 - ❖ Algunos micro reactores

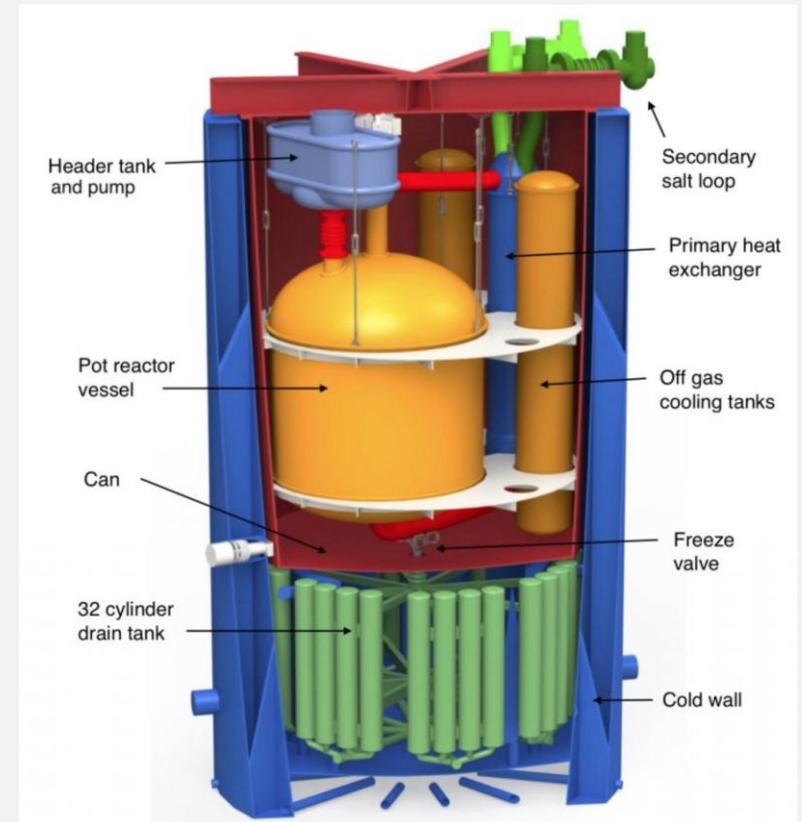


*ALWR: Advanced Light Water Reactor – reactores de agua ligera avanzados (PWR/BWR: Pressurized/Boiling Water Reactors)

Figure: CAREM APWR (Argentina) - APWR

Clases/Tipos de SMRs y Características

- **Reactores Avanzados GEN IV** (primeros en su clase)
 1. Reactores de Gas de Alta Temperatura (HTGR – High Temperature Gas Reactors)
 - Refrigerados con helio (estable y eficiente)
 - Producen electricidad y calor industrial
 2. Reactores Rápidos de Metal o Sodio (LMFR – Liquid Metal Fast Reactors)
 - Refrigerados con sodio o metal líquido
 - Muy eficientes y reproductor de combustible
 3. Reactores de Sal Fundida (MSR – Molten Salt Reactors)
 - Combustible disuelto en sal líquida
 - Safety pasiva mejorada



MSR

Países Implementando Varios Tipos de SMRs*

~ 70 diseños de SMRs en diferentes etapas activas de desarrollo y despliegue en ~20 países

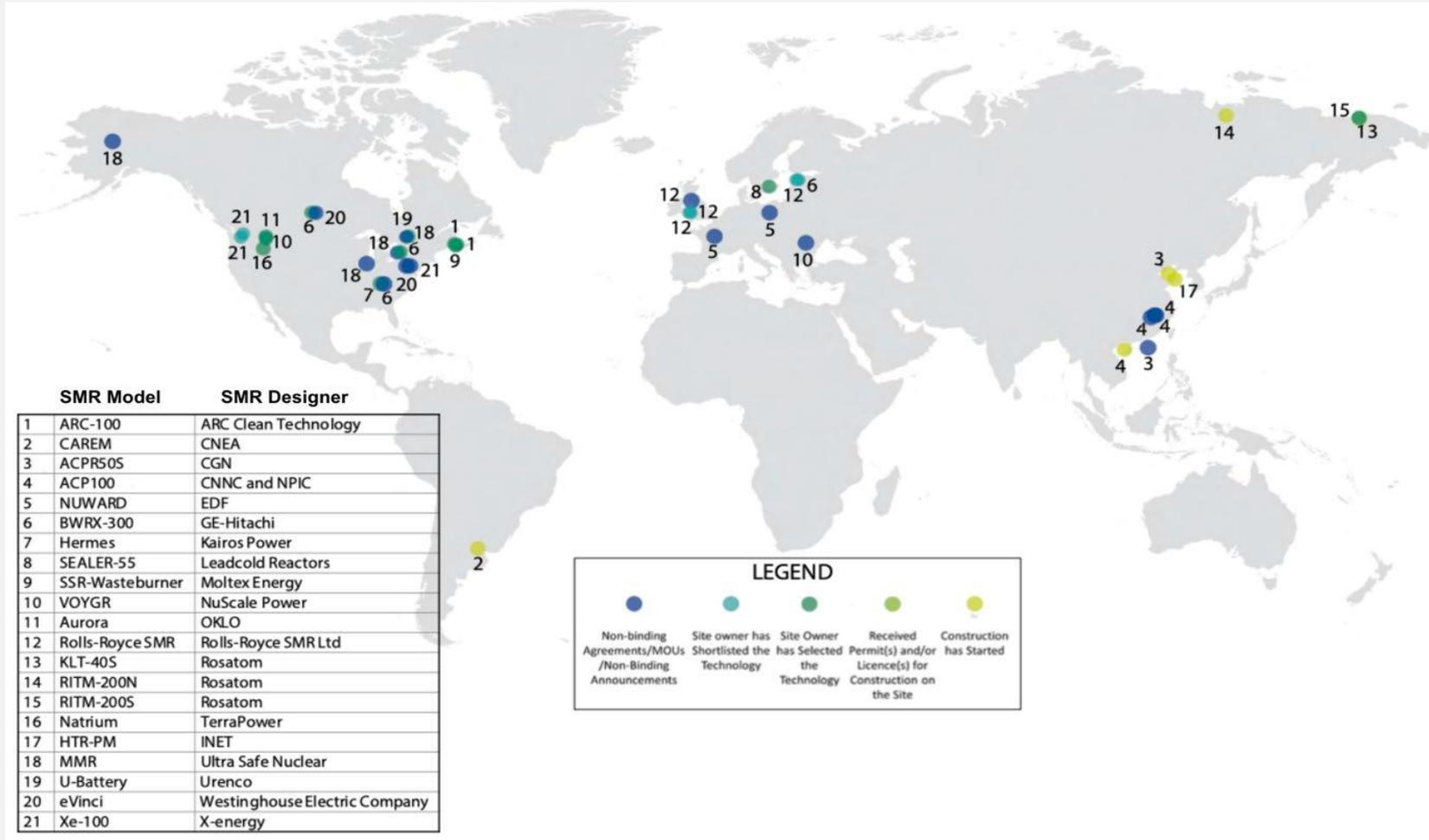
- Reactores en tierra: 14 ALWRs en 9 países
- Reactores marinos: 6 ALWRs en 4 países
- Microreactores: 13 en 4 países
- HTGR (gas cooled): 14 en 3 países
- MSR (Thorium): 11 en 6 países
- LMFR (sodio o metal): 10 en 3 países



First SMR Approved in the USA - NUSCALE

* International Atomic Energy Agency (IAEA): Advances in SMR Developments 2024, and Adv. Reactor Info. System (ARIS) database
Among the 68 active designs, 22 are water cooled reactors (WCRs) and 46 are not WCRs.

Países Implementando SMRs y Estado de Implementacion



* IAEA and NEA SMR Dashboards (2022)

By 2025: 4 reactors are operating and over additional 10 countries are in the process of implementing SMRs

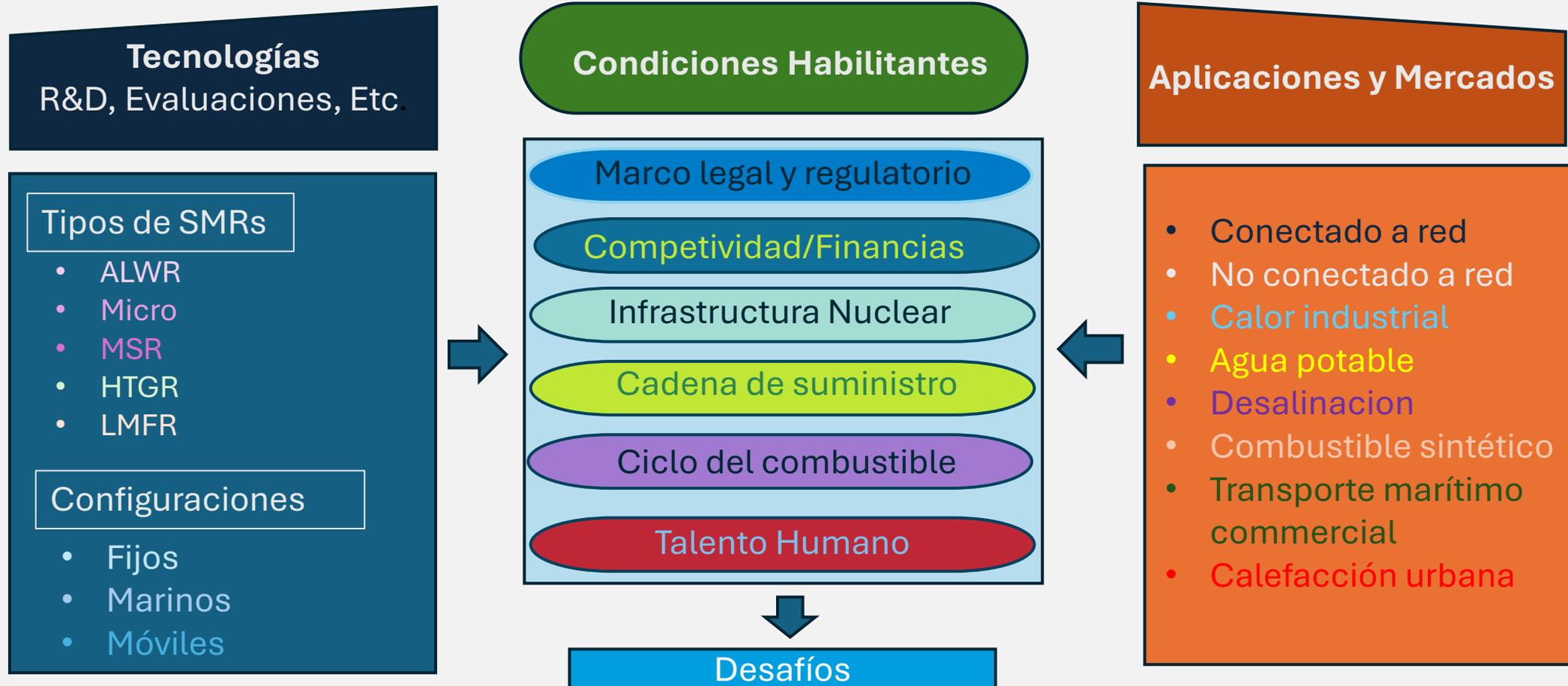
Beneficios Generales de los SMRs

- **Mejor safety:** Uso extensivo de sistemas pasivos que reducen el riesgo de accidentes
- **Más flexibilidad:** Capacidad de adaptación a redes pequeñas o regiones remotas, portables
- **Integración con renovables:** Operación complementaria para balancear fuentes intermitentes
- **Menor impacto ambiental (compactos)** - huella física reducida, menor uso de agua, zonas de planificación de emergencia reducidas
- **Modulares:** Escalable de una sola unidad a múltiples unidades para un sitio (desplegado incrementalmente para satisfacer la demanda de energía)
- **Más desarrollo económico:** Oportunidades industriales y más empleo

Beneficios Generales de los SMRs

- **Menor inversión:** Menor capital inicial (un módulo a la vez, más accesible para inversores privados)
- **Amplia gama de aplicaciones:** Energía eléctrica, desalinización, múltiples usos industriales, producción de hidrógeno, calefacción
- **Mayor seguridad:** Diseño de reactor sellado para prevenir proliferación
- **Adaptación de regulaciones:** Permiten adaptar regulaciones internacionales y el apoyo a la concesión de licencias
- **Producción en fábricas:** Economía global de escala para la fabricación
 - Producido de manera consistente y controlada, reduce la infraestructura requerida en relación con el ciclo del combustible nuclear y los desechos radiactivos
 - Potencialmente reduce los costos y los tiempos de construcción (menor costo que los reactores convencionales)

Condiciones Habilitantes para Conectar la Tecnología al Mercado



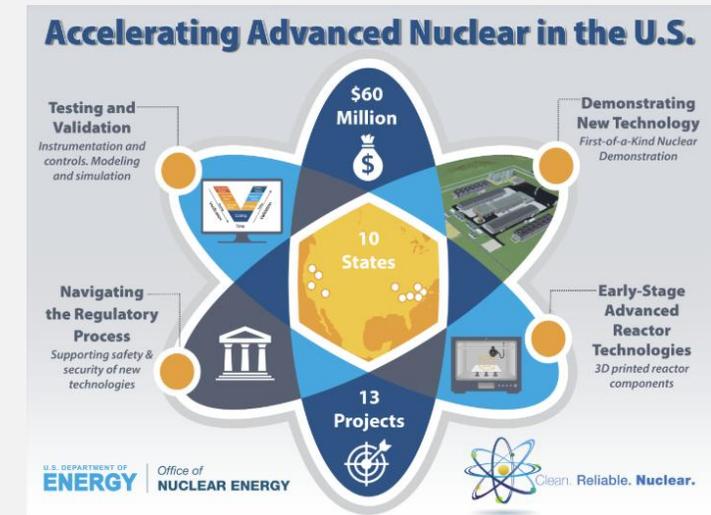
Desafíos Para Países Desarrollados (Nuclear)*

1. A pesar de avances significativos, algunos problemas técnicos aún requieren atención
 - Falta de aplicabilidad de los estándares industriales existentes (p.ej., ASME)
 - Falta de enfoque en fabricación para componentes novedosos
 - Adquisiciones de largo plazo para partes del reactor (retrasos)
 - Suministro de combustible y soluciones para el ciclo de combustible en su fase final (el combustible nuclear es difícil de obtener, tanto en su forma física como en la requerida)
 - Falta de proveedores con certificación NQA-1 (incluida la comprensión de la dedicación de grado comercial)

*Asume un marco legal y regulador establecido, así como infraestructura nuclear

Desafíos Para Países Desarrollados

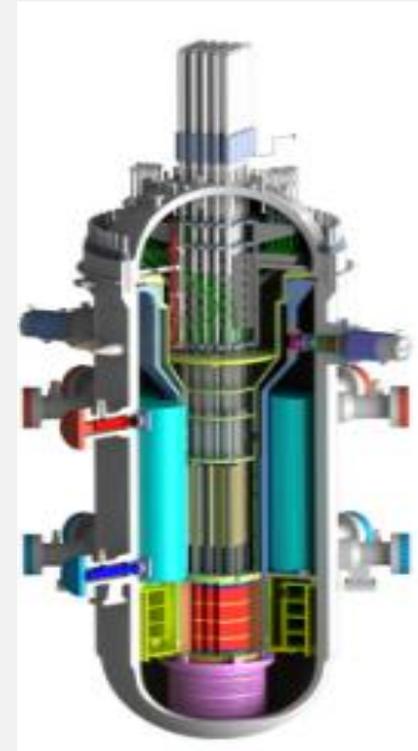
2. Adaptar la licencia y las regulaciones existentes (10CFR53) para primeros en su clase
3. Adaptar la infraestructura nuclear para apoyar los SMRs
4. Los GEN IV SMRs utilizan tecnología nueva con poca historia operativa
5. Viabilidad económica o competitividad en costos (menor producción que una central nuclear convencional, por lo tanto, menores ingresos y un LCOE* más alto ~US\$54/kWh)



* **Costo Nivelado de la Electricidad** (LCOE) estimado: aunque los SMRs prometen menores costos de capital inicial por unidad, su competitividad económica general aún no ha sido demostrada (OIEA 2024)

Desafíos Para Países en Desarrollo (Nuclear)*

1. Identificación de la tecnología/diseño de SMR “adecuado” según la aplicación deseada
 - **Aplicación:** Generación de electricidad, desalinización, procesos industriales, generación de hidrógeno
 - **Tecnología:** Clase (GEN III+ o IV) y Tipo (ALWR, HTGR, LMFR, MSR)
 - **Diseño:** Configuración (p.ej., terrestre, etc.), tipo de combustible, cadena de suministro, gestión de residuos, desmantelamiento
2. Cuestiones Financieras
 - Altos costos iniciales
 - Acceso al financiamiento (disponibilidad limitada de crédito, altas tasas de interés, apoyo financiero informal, riesgo regulatorio y político)
 - Conseguir inversión para tecnología (primera de su tipo): alto riesgo para los inversionistas



*Países usuarios, sin un marco legal y regulador establecido, y sin infraestructura nuclear

Desafíos Para Países en Desarrollo

3. Cuestiones de marco regulatorio

- Falta de apoyo legal, regulador y de licenciamiento (regulaciones complejas o inexistentes, corrupción, necesidad de una autoridad reguladora nuclear nacional independiente, falta de protección legal)
- Escasos o nulos estándares industriales y guías disponibles para respaldar el ciclo de vida de los SMRs

4. Falta de infraestructura nuclear

- Industria nuclear inexistente o limitada
- Carreteras y medios de transporte deficientes (ubicaciones remotas)
- Acceso poco fiable o difícil al suministro eléctrico y a la red



Desafíos Para Países en Desarrollo

5. Falta de recursos humanos

- Falta de personal calificado para apoyar el ciclo de vida de los SMRs
- Bajos niveles de educación
- Bajos niveles de capacitación técnica

6. Falta de cadena de suministro (incluidos los costos iniciales)

- Dificultad para encontrar una cadena de suministro sólida y confiable para componentes y materiales

7. Ciclo del combustible

- Dificultad para obtener un suministro de combustible confiable y safe (p.ej., sin recursos conocidos de uranio, enriquecimiento, fabricación de combustible)
- Falta de gestión del combustible gastado (p.ej., desechos nucleares y desmantelamiento)



Desafíos Para Países en Desarrollo

8. Falta de medidas de no proliferación
 - Preocupaciones sobre el posible uso con fines militares
 - Falta de salvaguardias sólidas
9. Falta de seguridad y salvaguardias (amenazas potenciales)
 - Difícil y costoso de defender
 - Posibles ataques terroristas
10. Falta de aceptación pública
 - Percepciones negativas sobre la energía nuclear
 - Preocupaciones por el **safety** de los SMRs y combustible gastado
 - Relación percibida con accidentes históricos en plantas nucleares (p.ej., Fukushima, Chernóbil) o incluso con armas nucleares



Recomendaciones para su Implementación en Colombia

1. Identificación de la tecnología/diseño de SMR “adecuado” según la aplicación deseada
 - Aplicación: Generación de electricidad exclusivamente (inicialmente) – es necesario definir la capacidad de generación requerida.
 - Tecnología: SMRs de Generación III+ (con combustible LEU) – Solo cuando estén completamente demostrados y validados (SMRs estandarizados)

Seleccionar y construir reactores que ya han demostrado y validado tecnologías que han sido estandarizadas, como los reactores de agua ligera (LWR) de Generación III+

2. Diseñar estrategias de financiamiento
 - Crear asociaciones público-privadas
 - Incentivos gubernamentales para la inversión
 - Para reducir costos, comenzar con una sola unidad SMR que cumpla con la capacidad de generación requerida

Financiar una opción de energía nuclear requiere una política nacional y apoyo financiero gubernamental a largo plazo

Recomendaciones para su Implementación en Colombia

3. Adoptar un marco legal y regulatorio

- La armonización de los requisitos y procesos de licenciamiento puede facilitar la implementación de SMRs sin requerir adaptaciones significativas
- Los recursos y la orientación proporcionados por países proveedores y agencias internacionales* son fundamentales para el desarrollo de un régimen regulatorio

Al seleccionar un SMR estandarizado, se podrían adoptar procesos de licenciamiento y regulación estandarizados de proveedores o agencias internacionales*

4. Infraestructura nuclear

- Seleccionar un sitio que facilite la implementación del SMR seleccionado
- Alianzas con países líderes en SMRs (proveedor)
- Participación en proyectos piloto y demostrativos (p.ej., reactor de investigación)

Desarrollar un plan para construir la infraestructura nuclear de manera gradual

*IAEA offers guidance/services on regulatory framework and building human resources; also, the Nuclear Energy Agency (NEA) of the Org. for Economic Co-Operation and Development (OECD), and Foundational Infrastructure for Responsible use of SMR Tech. (FIRST)

Recomendaciones para su Implementación en Colombia

5. Desarrollar recursos humanos

- Comenzar a desarrollar un plan de estudios de al menos cursos básicos de ingeniería nuclear o tecnologías nucleares
- Necesidad de depender inicialmente del proveedor o agencias internacionales para obtener recursos

Crear un plan para desarrollar de manera gradual la capacidad técnica nuclear y la infraestructura asociada que la respalde

6. Desarrollo de la cadena de suministro

- Inicialmente se debe depender de proveedores del extranjero

Desarrollar un plan para crear una cadena de suministro de componentes y materiales nucleares calificados

Recomendaciones para su Implementación en Colombia

7. Desarrollar un ciclo de combustibles

- Al seleccionar GEN III+ SMRs , la adquisición de combustible LEU se vuelve más sencillo
- Buscar una fuente confiable y segura de suministro de combustible (de calidad)
- No es recomendable establecer inicialmente una fuente nacional de suministro de combustible (es costosa y requiere muchos recursos)

Desarrollar acuerdos con los proveedores para el ciclo de combustible, pero también se debe definir cómo abordar el almacenamiento del combustible gastado

8. Medidas de no proliferación

- Es probable que el proveedor y el país suministrador impongan salvaguardias para medidas de no proliferación y para evitar el uso de material nuclear con fines militares

Por el momento, no es necesario abordar este tema, ya que probablemente será impuesto como parte del proceso de adquisición del SMR seleccionado por parte del país proveedor

Recomendaciones para su Implementación en Colombia

9. Seguridad y salvaguardias (amenazas potenciales)

- Seleccionar un sitio que facilite la implementación de medidas de seguridad
- Cumplir con las convenciones internacionales que rigen la seguridad, protección, salvaguardias y responsabilidad (p.ej., AIEA)
- Es necesario trabajar con el proveedor para abordar las preocupaciones de seguridad a lo largo del ciclo de vida del reactor y del combustible

Desarrollar un plan para abordar la seguridad de la ubicación y el SMR seleccionado

10. Percepción pública y temor (aceptación social)

- Campañas de información pública
- Participación de comunidades locales en decisiones energéticas
- Comenzar un plan para abordar la tecnología nuclear en la educación

Desarrollar un plan para abordar la percepción pública de la tecnología nuclear



Gracias por su atención

¿alguna pregunta?

**Small
Modular
Reactors**



Séptimo foro

xm