



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Planeación de la implementación
de una planta nucleoelectrica tipo
SMR en Baja California Sur**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Eléctrico Electrónico

P R E S E N T A

Omar Pérez Parrazal

DIRECTORA DE TESIS

Dra. Pamela Fran Nelson Edelstein



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2023



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos al Proyecto PAPIIT No. IT102621 “Modelación de la Transición Energética para evaluar los Beneficios Económicos, Ambientales y Sociales de México al 2030”.

Agradecimientos a la Dra. Pamela Fran Nelson Edelstein y la Dra. Cecilia Martín del Campo Márquez por su apoyo y confianza durante el desarrollo de la presente tesis.

Agradecimiento a mi padre Jaime Pérez Delgado y a mi madre Cecilia Parrazal Baltierrez por apoyarme durante toda mi vida y en cada decisión que he tomado, así como alentarme a seguir adelante y buscar superar los obstáculos a los que me enfrente.

Contenido

| | |
|--|----|
| Agradecimientos..... | 2 |
| Lista de tablas..... | 5 |
| Lista de figuras..... | 6 |
| Lista de acrónimos..... | 8 |
| I. Introducción..... | 9 |
| A. Objetivos..... | 9 |
| 1) Objetivo general..... | 9 |
| 2) Objetivos particulares..... | 9 |
| B. Alcances..... | 9 |
| C. Justificación..... | 10 |
| D. Antecedentes..... | 10 |
| E. Organización de la tesis..... | 11 |
| II. Situación energética de Baja California Sur..... | 13 |
| A. Introducción..... | 13 |
| B. Geografía y Población de Baja California Sur..... | 13 |
| C. Economía en Baja California Sur..... | 15 |
| D. Estado de Energía en Baja California Sur..... | 16 |
| 1) Red de Transmisión Eléctrica..... | 16 |
| 2) Capacidad Instalada..... | 18 |
| 3) Generación Eléctrica..... | 19 |
| 4) Demanda Energética..... | 20 |
| 5) Fallas eléctricas..... | 21 |
| E. Estado de la Calidad del Aire..... | 21 |
| 1) Reglamentos y normatividades..... | 21 |
| 2) Monitoreo..... | 22 |
| 3) Emisiones..... | 22 |
| F. Estado de la calidad del Agua..... | 24 |
| III.Small Modular Reactors..... | 27 |

| | |
|---|----|
| A. Introducción | 27 |
| B. La Energía Nuclear | 27 |
| C. Small Modular Reactors..... | 28 |
| D. El estado de la energía nuclear..... | 29 |
| 1) Generación a nivel mundial | 29 |
| 2) Generación a nivel nacional | 30 |
| 3) Opinión pública y Aceptación a nivel mundial..... | 31 |
| 4) Opinión pública y Aceptación a nivel nacional..... | 32 |
| E. Objetos de estudio | 33 |
| 1) NuScale – VOYGR-12 | 34 |
| 2) Terrestrial Energy – Integral MSR..... | 36 |
| 3) X-Energy – Xe-100..... | 38 |
| 4) GE-Hitachi – BWRX-300..... | 40 |
| F. SMRs como alternativa en procesado químico..... | 42 |
| 1) SMRs en la producción de hidrógeno y gas natural/sintético | 42 |
| 2) SMRs en la desalinización del agua | 44 |
| IV. Metodología KIND | 46 |
| A. Dimensiones e indicadores..... | 46 |
| B. Aplicación de la metodología..... | 48 |
| 1) Factores de ponderación..... | 48 |
| 2) Tabla de desempeño..... | 49 |
| 3) Tabla de funciones de valor de atributo único..... | 51 |
| 4) Clasificación de resultados..... | 53 |
| 5) Análisis de sensibilidad | 54 |
| C. Interpretación de resultado | 57 |
| V. Conclusiones..... | 58 |
| Referencias | 59 |

Lista de tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 1 - Población total de BCS por municipio, 2000-2020 | 14 |
| Tabla 2 - Capacidad instalada en BCS al 30 de abril del 2021 | 18 |
| Tabla 3 - Generación Bruta en BCS al 31 diciembre del 2019 | 19 |
| Tabla 4 - Número de usuarios afectados por los apagones en BCS en 2019 | 21 |
| Tabla 5 - Emisiones en La Paz BCS 2018..... | 24 |
| Tabla 6 - Emisiones en La Paz BCS 2019..... | 24 |
| Tabla 7 - Características del VOYGR-12 | 36 |
| Tabla 8 - Características del Integral SMR..... | 38 |
| Tabla 9 - Características del Xe-100 | 40 |
| Tabla 10 - Características del BWRX-300 | 42 |
| Tabla 11 - Factores de ponderación | 49 |
| Tabla 12 – Desempeños | 50 |
| Tabla 13 - Funciones de valor de atributo único (Forma lineal)..... | 51 |
| Tabla 14 - Clasificación de Resultados..... | 53 |
| Tabla 15 - Factores de ponderación (Caso modificado) | 54 |
| Tabla 16 - Análisis de sensibilidad de los factores de ponderación..... | 55 |
| Tabla 17 - Funciones de valor de atributo único (Caso Exponencial)..... | 56 |
| Tabla 18 - Análisis de sensibilidad de funciones de valor de atributo único | 56 |

Lista de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1 – División política de Baja California Sur | 13 |
| Figura 2 - Crecimiento poblacional de Baja California Sur 1970 – 2020..... | 15 |
| Figura 3 - Tasa de crecimiento económico de Baja California Sur y Nacional, 2010-2019% | 15 |
| Figura 4 - Producto Interno Bruto de BCS por actividad económica, 2019 (Millones de pesos) | 16 |
| Figura 5 - Enlaces de Transmisión del SEN al 30 de abril del 2021 | 17 |
| Figura 6 - Capacidad Instalada en BCS al 30 de abril del 2021 | 18 |
| Figura 7 - Generación Bruta en BCS al 31 de diciembre del 2019 | 19 |
| Figura 8 - Comportamiento de la demanda máxima integrada del sistema interconectado Baja California Sur 2018, 2019 y 2020..... | 20 |
| Figura 9 - Comportamiento de la demanda máxima integrada del sistema interconectado Mulegé 2018, 2019 y 2020 | 20 |
| Figura 10 - Ubicación de las Estaciones de Monitoreo en BCS..... | 22 |
| Figura 11 - Evolución de contaminantes criterio por fuentes fijas en La Paz, BCS..... | 23 |
| Figura 12 - Emisiones de contaminantes criterio por las centrales eléctricas en La Paz 2019.. | 23 |
| Figura 13 - Proporción de población con agua todos los días y saneamiento básico mejorado por la entidad federativa. | 24 |
| Figura 14 - Volumen de explotación [m ³]..... | 25 |
| Figura 15 - Fisión Nuclear | 27 |
| Figura 16 - Clasificación de los reactores nucleares..... | 28 |
| Figura 17 - Electricidad producida por fuente en el mundo..... | 29 |
| Figura 18 - Participación en la producción de electricidad por fuente en el mundo | 30 |
| Figura 19 - Porcentaje de la capacidad instalada por tipo de tecnología al 31 de Diciembre del 2020 | 30 |
| Figura 20 - Evolución del apoyo al uso de reactores nucleares para generar electricidad en México | 33 |
| Figura 21 - SMR de NuScale..... | 35 |
| Figura 22 - SMR de Terrestrial Energy | 37 |
| Figura 23 - SMR de X-Energy | 39 |
| Figura 24 - SMR de GE-Hitachi | 41 |
| Figura 25 - Emparejamiento de un HTTR-30 con una planta reformadora de metano | 43 |
| Figura 26 - Planta HTR-BiGas | 43 |
| Figura 27 - Esquema simplificado del sistema de desalinización nuclear CANDU-6 CANDESAL | 44 |
| Figura 28 - Esquema propuesto para la HyPP desalinizadora de la UTD..... | 45 |
| Figura 29 - Árbol de Objetivos..... | 47 |
| Figura 30 - Escala de Likert | 49 |

| | |
|---|-----------|
| Figura 31 - Gráfico de los valores de atributo único..... | 52 |
| Figura 32 - Gráfico de los Puntajes de Área | 53 |
| Figura 33 - Gráfico de los Objetivos de Alto Nivel | 54 |
| Figura 34 - Gráfico de los Valores Multi-Atributo..... | 54 |
| Figura 35 - Análisis de sensibilidad de los factores de ponderación | 55 |
| Figura 36 - Análisis de sensibilidad de funciones de valor de atributo único | 57 |

Lista de acrónimos

BCS – Baja California Sur

CENACE – Centro Nacional de Control de Energía

CERCA – Centro de Energía Renovable y Calidad Ambiental

CFE – Comisión Federal de Electricidad

CONACYT – Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología

GBCS – Gobierno de Baja California Sur

GEI – Gases de Efecto Invernadero

IMCO – Instituto Mexicano para la Competitividad

LEEPAEBCS – Ley del Equilibrio y la Protección del Ambiente del Estado de Baja California Sur

LGEEPA – Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección del Ambiente

MEM – Mercado Eléctrico Mayorista

NES – Nuclear Energy System (Sistema de Energía Nuclear)

OIEA – Organización Internacional de Energía Nuclear

PAMRNT – Programa de Ampliación y Modernización de la RNT y RGD del MEM

PROAIRE – Programa de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire

PRODESEN – Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional

RNT – Red Nacional de Transmisión

RGD – Redes Generales de Distribución

SEMARNAT – Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales

SENER – Secretaría de Energía

SETUES – Secretaría de Turismo, Economía y Sustentabilidad

SMR – Small Modular Reactor (Reactor Modular Pequeño)

I. INTRODUCCIÓN

A. Objetivos

1) Objetivo general

Realizar el análisis del sector eléctrico del estado de Baja California Sur y proponer una planeación de escenarios de implementación de Reactores Modulares Pequeños (SMRs) considerando la metodología de decisión multicriterio “KIND”.

2) Objetivos particulares

- Determinar el estado energético actual en Baja California Sur y analizar la demanda considerando los picos máximos de energía para la planeación a largo plazo.
- Investigar, analizar y seleccionar cuatro SMRs, que cumplan con las características técnicas que convengan para ser instalados en BCS en el menor tiempo posible
- y necesidades impuestos por la nación.
- Realizar un diagnóstico a través de la metodología KIND de los criterios económicos, sociales, de desempeño y ambientales, para poder realizar la conformación de indicadores que ayuden al análisis de la toma de decisiones.
- Con base en los indicadores obtenidos, elaborar un análisis para determinar la viabilidad de cada uno de los escenarios de planeación propuestos para la implementación de los SMRs.

B. Alcances

Analizar el sector eléctrico del estado de Baja California Sur para determinar la demanda eléctrica a largo plazo, así como de sus efectos ambientales y sociales. A partir de estos resultados, se busca generar una planeación fundamentada de la implementación de un SMR a fin de cubrir la demanda eléctrica, lograr una mayor seguridad energética y buscar una transición a energías limpias reduciendo el uso de combustibles fósiles y por ende la huella de carbono.

Respectivo a los SMRs, se busca realizar una investigación de los modelos que cumplan con los requisitos y necesidades establecidos por el gobierno con objeto de seleccionar y analizar cuatro SMRs, los cuales serán comparados a través de la metodología de selección multicriterio “KIND”.

A partir de la metodología “KIND” se busca generar criterios económicos, de desempeño, sociales y ambientales adecuados para realizar escenarios que cumplan con los objetivos establecidos y poder realizar una propuesta de implementación de un SMR en el estado de Baja California Sur.

Como añadido se busca considerar el uso de los SMRs para actividades alternativas a la generación de energía, como la producción de hidrógeno, procesados químicos e incluso la desalinización del agua, con objeto de apoyar al sector social, ambiental y económico.

C. Justificación

Baja California Sur es un estado que se encuentra aislado del Sistema Eléctrico Nacional, en el cual se encuentran dos sistemas: es Sistema de Baja California Sur (SBCS), el cual interconecta los municipios Comondú, La Paz, Loreto y Los Cabos, y otro sistema para Mulegé el cual es realmente un sistema aislado. De estos municipios solo Comondú, La Paz y Mulegé son productores de electricidad.

El estado del Sistema Eléctrico de Baja California Sur (SEBCS) es ineficiente y de baja confiabilidad (incertidumbre en el suministro eléctrico), contaminante (contaminación del aire) y caro (produce altas tarifas), que, aunado al crecimiento poblacional, ha incrementado la demanda eléctrica.

Esta situación genera afectaciones en los ecosistemas, problemas de salud por contaminación del aire, problemas sociales por las altas tarifas y constantes cortes de suministro. Así mismo, al haber un problema económico de competitividad, al no contar con un sistema eléctrico en buen estado y eficiente no se puede garantizar el abasto de electricidad, lo que impide el crecimiento de los sectores económicos del estado.

En el caso de los últimos dos años 2020 y 2021 se produjo una reducción en el consumo de la energía, no por temas de ahorro, sino por la falta de disponibilidad y por la caída del sector turístico de la cual depende el estado, el cual se vio afectado por la pandemia del SARS COVID-19.

De seguir con su dinamismo económico como en 2020 y 2021, la falta de disponibilidad de energía derivaría, de acuerdo a proyecciones, en más de 81 intermitencias o cortes de suministro futuros. (CERCA, Propuesta de energía para BCS).

Para intentar cubrir y superar las problemáticas que presenta el sistema eléctrico de Baja California Sur, así como la participación en el proyecto “Escenario de implementación sostenible para Reactores Modulares Pequeños” de la Organización Internacional de Energía Nuclear (OIEA) tomando como base de estudio a México, una de las posibles soluciones podría ser implementar un Reactor Modular Pequeño (SMR) en BCS.

Los SMRs son reactores nucleares avanzados con una capacidad de hasta 300MWe que debido a su pequeño tamaño tienen una mayor versatilidad de localización, al ser modulares éstos son fabricados en fábricas, sus módulos son transportados e instalados in situ, lo que los vuelve una opción más asequible y de rápida construcción, así mismo proporciona energía de forma ininterrumpida con baja o incluso libre de emisiones de carbono, lo que la vuelve una energía limpia. Añadido a esto, los SMRs se pueden ocupar para otros procesos como la desalinización del agua, producción de hidrógeno o procesado de químicos.

D. Antecedentes

Actualmente, el mundo busca hacerle frente a la problemática del cambio climático, los países que aceleran la transición energética, entendida como un cambio en los sistemas energéticos para reducir la dependencia de combustibles fósiles e incrementar la participación de las energías renovables y tecnologías limpias, tendrán ventaja competitiva para atraer y retener talento e inversiones.

El acuerdo de París de 2015 busca limitar el aumento de la temperatura a 1.5°C respecto a los niveles preindustriales. Al firmarlos, México se comprometió a reducir un 22% los gases de efecto invernadero y 51% los de carbono negro, así como generar 35% de energías limpias para el 2024 y 43% para el 2030. Así mismo la COP26 buscará acelerar las acciones de descarbonización y electrificación más allá de los compromisos de París. Sin embargo, las metas distan de los esfuerzos para promover el uso de energías limpias y avanzar con la transición energética. México llegará sin cumplir sus metas del 2015, sin un plan con metas ambiciosas, con un fondo para el cambio climático extinto y una aparente dependencia a los combustibles fósiles. (Sonia Mancera, Oscar Ocampo, 07/10/21, IMCO)

La evidencia científica muestra que México entró en una década de decadencia en la etapa natural de declive de la producción de hidrocarburos, provocando un aumento en la importación de petrolíferos. Tomando en cuenta el creciente impacto ambiental que conlleva la producción y consumo de la energía fósil, la transición energética hacia fuentes renovables resulta inevitable. Por ello, México cuenta con el Programa Nacional Estratégico de Transición Energética (PRONACES-TE) que pretende generar ahorro energético en el sector del transporte, la descarbonización gradual del uso y generación de la energía en el sector industrial, el impulso de las fuentes de origen renovable para propósitos térmicos y eléctricos en los sectores residenciales y comerciales, y acciones para la eliminación de la pobreza energética. (CONACYT, Energía y cambio climático, 2021)

México tiene experiencia con la energía nuclear con su central eléctrica de Laguna Verde ubicada en Veracruz la cual cuenta con dos reactores BWR-5 de General Electric construidos a partir del año 1972 y puestos en marcha el primero en 1990 y el segundo en 1995. Cuenta con una capacidad instalada de 1640MW con dos unidades generadoras de 820MWe cada una. La central es propiedad de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y es operada y administrada a través de la Agencia de Centrales Nucleoeléctricas, aparte de estar sujeta a la supervisión de organismos nacionales e internacionales con el objetivo de que cumpla con las regulaciones necesarias para operar de manera segura.

En México existe el Sistema Eléctrico Nacional (SEN), que está integrado por 10 regiones de control, de las cuales, 7 están interconectadas y componen el Sistema Interconectado Nacional (SIN) abarcando la mayor parte del país. Las 3 regiones faltantes son regiones eléctricas aisladas, las cuales son Baja California, Baja California Sur y Mulegé, las cuales se espera se interconecten al SIN entre el año 2023 y 2024 (PRODESEN 2018-2032, 2020)

Al 30 de abril del 2021 México cuenta con una capacidad instalada total de 89,479MW, de las cuales 65.9% corresponden a energías fósiles y el 34.1% a energías renovables y nuclear.

Del 1 de enero al 30 de abril del 2021 México cuenta con una generación eléctrica total de 99,097 GWh, de las cuales 69.8% corresponden a energías fósiles y el 30.12% a energías limpias y nuclear.

E. Organización de la tesis

El presente trabajo se estructura en 5 capítulos, en los cuales los temas expuestos son:

1. *Introducción*: En esta sección se presentan los antecedentes, el planteamiento del problema, se definen los objetivos, las metas, se da a conocer la justificación y el alcance.

2. *Situación energética de Baja California Sur*: En este capítulo se abarca el panorama general del estado de Baja California Sur, su estado energético y sus efectos en los sectores sociales y ambientales.
3. *Reactores Modulares Pequeños*: Para este apartado se abordan los temas de la energía nuclear, los SMRs y algunos de sus tipos, y los modelos seleccionados como objeto de análisis para la planeación de los escenarios de implementación de SMRs.
4. *Metodología KIND*: Este capítulo introduce a la metodología de decisión multicriterio “KIND”, la cual es utilizada en este trabajo. Se establecen los criterios e indicadores, y con base en ello se desarrolla el análisis comparativo de los SMRs previamente seleccionados.
5. *Conclusiones*: En este último capítulo se presenta la explicación de los resultados finales y su interpretación de forma accesible al lector.

II.SITUACIÓN ENERGÉTICA DE BAJA CALIFORNIA SUR

A. Introducción

En este capítulo el estado de Baja California Sur será presentado en sus generalidades, así mismo se realizará una inspección al sector eléctrico. Dentro de las generalidades observaremos su geografía, su actividad económica particular y su población. En cuando al sector eléctrico definiremos la capacidad instalada y la generación de electricidad, además de ver el comportamiento de la demanda y consumo de la región.

B. Geografía y Población de Baja California Sur

El estado de Baja California Sur (BCS) está ubicado al Noroeste del territorio mexicano, ocupando la mitad Sur de la península de Baja California. Limita al Norte con el estado de Baja California situado por encima del paralelo 28°N, al Este con el mar de Cortés y al Sur y Oeste con el Océano Pacífico. Sus coordenadas son: 28°00' al Norte, al Sur 22°52' de latitud Norte, al Este 109°25' y al Oeste 115°05' de longitud Oeste.

Se compone por 5 municipios siendo estos: Comondú, La Paz, Los Cabos, Loreto y Mulegé (Ver Figura 1). Su capital es la ciudad de La Paz. Se extiende por una superficie de 73,922.47km², ocupando un 3.8% del territorio nacional.



Figura 1 – División política de Baja California Sur

Fuente: Información Estratégica de Baja California Sur (Gobierno de Baja California Sur, 2021)

Geográficamente Baja California Sur cuenta con las siguientes características:

- **Relieve:** Se caracteriza por la sierra paralela a la costa, de suaves pendientes por el oeste y escarpada hacia el Golfo de California, se prolonga hasta el mar y tiene una altitud de 600m. Está formada por roca de origen volcánico y recibe el nombre de La Giganta. Una larga planicie costera por el occidente, con 40 km de anchura media, permite la formación

de extensos llanos como los de Santa Clara, Berrendo y la Magdalena e Hiray, de rocas sedimentarias marinas, en especial calizas. Por el este se compone de playas angostas.

- Altitudes: Su altitud mínima es la del nivel del mar, mientras que la máxima llega a 2080m en la sierra de La Laguna.
- Litorales: Tienen 2230 km de costas, entre las que destacan las bahías de Sebastián Vizcaíno, Magdalena, La Paz, Asunción, Ballenas, Concepción y San Carlos.
- Islas: Cuenta con 14 islas. En el Pacífico se encuentran Natividad, Magdalena y Santa Margarita. En el mar de Cortés se encuentra San Marcos, Coronados, Carmen, Monserrat, Santa Catalina, Santa Cruz, San Diego, San José, San Francisco, Partida, Espíritu Santo y Cerralvo.
- Hidrografía: Cuenta con corrientes de tipo estacionario con caudal que sólo en épocas de lluvias forman arroyos turbulentos y depositan sus aguas en el mar, principalmente en la vertiente del Pacífico, como los arroyos San Benito, San Miguel y Raymundo; el río San Ignacio, de mayor longitud, desemboca en la Bahía de Ballenas.
- Clima: El clima en Baja California Sur es típicamente seco, sólo la región de Los Cabos cuenta con clima cálido subhúmedo, influido por ciclones. Vientos dominantes en primavera provenientes del Oeste y Sur, en verano del Sur y Suroeste, en otoño del Noroeste y en invierno del Norte y Noroeste. Su temperatura media anual es de 18°C a 22°C, la promedio más alta de 35°C entre los meses de julio y agosto, y su promedio más baja es de 9°C registrada en enero. En la ciudad de Loreto se han registrado temperaturas máximas extremas de 40°C en los meses de mayo a septiembre.
- Sismicidad: BCS cuenta con una sismicidad que por lo general no pasa del 5.5.
- La población total del estado, al 2020, es aproximadamente de 798,447 habitantes siendo 405,879 hombres (50.8%) y 392,568 mujeres (49.2%). En la Tabla 1 se muestra el crecimiento poblacional por municipio y total de BCS entre los años 2000, 2010 y 2020, donde se ha visto un incremento de casi el doble respecto al año 2000, pero sin superar los 804,708 habitantes como se esperaba. En la Figura 2 se aprecia el incremento poblacional a lo largo de 50 años entre los años 1970 a 2020.

| Tabla 1 - Población total de BCS por municipio, 2000-2020 | | | |
|--|--------------------------|-------------|-------------|
| Municipio | Población por año | | |
| | 2000 | 2010 | 2020 |
| Comondú | 6,864 | 70,816 | 73,021 |
| Mulegé | 45,989 | 59,114 | 64,022 |
| La Paz | 196,907 | 251,871 | 292,241 |
| Los Cabos | 105,469 | 238,487 | 351,111 |
| Loreto | 11,812 | 16,738 | 18,052 |
| Total | 424,041 | 637,026 | 798,447 |

Fuente: Censos Generales de Población y Vivienda, 2000 - 2020 (INEGI)

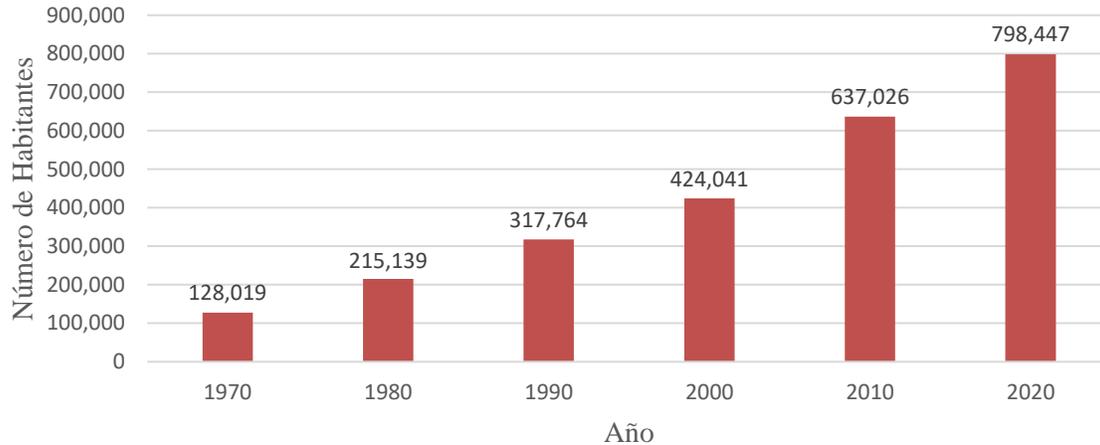


Figura 2 - Crecimiento poblacional de Baja California Sur 1970 – 2020

Fuente: Elaboración propia con datos del “Censos Generales de Población y Vivienda, 1970 - 2020” (INEGI)

C. Economía en Baja California Sur

Según datos del INEGI, el PIB en Baja California Sur en el año 2019 fue de 215,297 millones de pesos lo que presentó una caída del -8.6% respecto al año anterior y en el 2020 dados los estragos causados por el SARS-COVID-19 se generó un decremento del -23.6% en el periodo de enero-septiembre, en la que la media nacional fue de -9.4% (ver Figura 3).

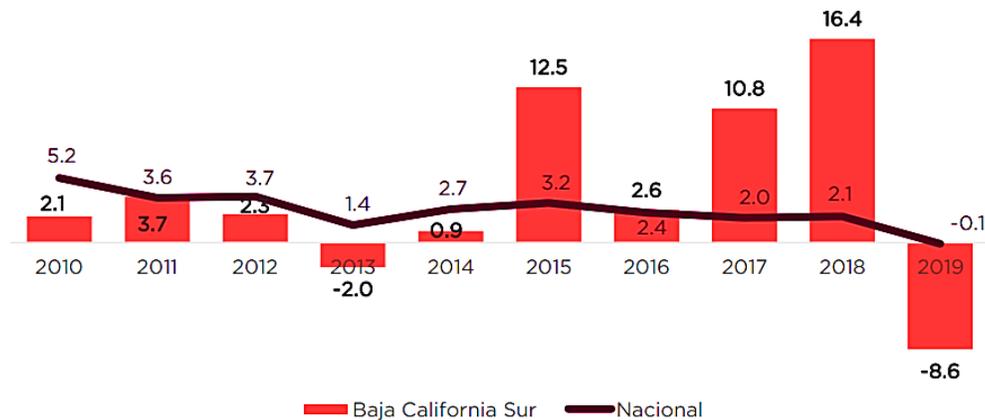


Figura 3 - Tasa de crecimiento económico de Baja California Sur y Nacional, 2010-2019%

Fuente: Información Estratégica de Baja California Sur (INEGI, PIB y Cuentas Nacionales de México)

La economía de BCS distribuye su PIB en actividades: primarias (3.4%), secundarias (31.3%) y terciarias (65.3%). Las ramas más importantes son: construcción (21%), comercio (19.2%), servicios de alojamiento temporal y preparación de alimentos (13.3%), actividades inmobiliarias y de alquiler (7.5%), transportes, correos y almacenamiento (6.5%) y actividades del gobierno (5.09%). En la Figura 4 se muestra el PIB por actividad económica en millones de pesos.

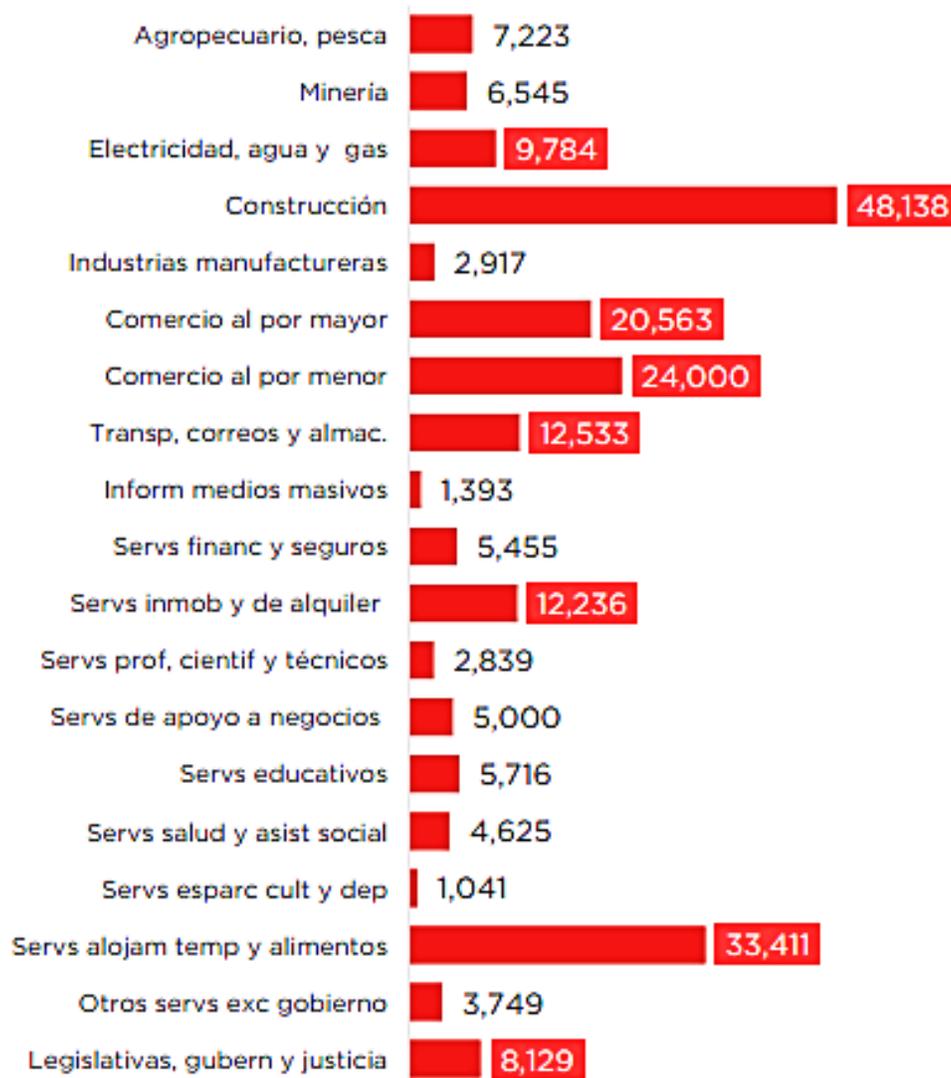


Figura 4 - Producto Interno Bruto de BCS por actividad económica, 2019 (Millones de pesos)

Fuente: Información Estratégica de Baja California Sur (INEGI, PIB y Cuentas Nacionales de México)

D. Estado de Energía en Baja California Sur

1) Red de Transmisión Eléctrica

Conforme al artículo 2 de la Ley de la Industria Eléctrica (LIE), la industria eléctrica comprende las actividades de generación, transmisión, distribución y comercialización de la energía eléctrica, la planeación y el control del Sistema Eléctrico Nacional, así como la operación del Mercado Eléctrico Mayorista (MEM). La planeación y el control del SEN, así como el Servicio Público de Transmisión y Distribución de Energía Eléctrica, son áreas estratégicas. En estas materias el Estado mantendrá su titularidad, sin prejuicios de que pueda celebrar contratos con particulares en los términos de la presente Ley. El suministro Básico es una actividad prioritaria para el desarrollo nacional.

El SEN está constituido por redes eléctricas de diferentes niveles de tensión:

- Red Nacional de Transmisión (RTN): Sistema integrado por las redes eléctricas que se utilizan para transportar energía a las Redes Generales de Distribución y a los usuarios que por características de sus instalaciones lo requieran, así como las interconexiones a los sistemas eléctricos extranjeros que determine la Secretaría de Energía (SENER). Incluye tensiones iguales o mayores a 69kV.
- Redes Generales de Distribución (RGD): Redes eléctricas que se utilizan para distribuir energía eléctrica al público general; está integrada por redes en media tensión, cuyo suministro eléctrico corresponde a niveles entre 1kV a 69kV, así como las redes de baja tensión en las cuales el suministro eléctrico es menor a 1kV.
- Redes Particulares: Son las redes eléctricas que no forman parte de la RNT o de las RGD.

El SEN está compuesta por 10 regiones de control distribuidas a su vez en 89 puntos a lo largo del territorio mexicano que sirven para enlaces de transmisión como se muestra en la Figura 5. De estos 89 puntos, 70 corresponden al Sistema Interconectado Nacional (SIN) y las 19 restantes a sistemas aislados en la península de Baja California Sur. (SENER, PRODESEN (2021-2035))

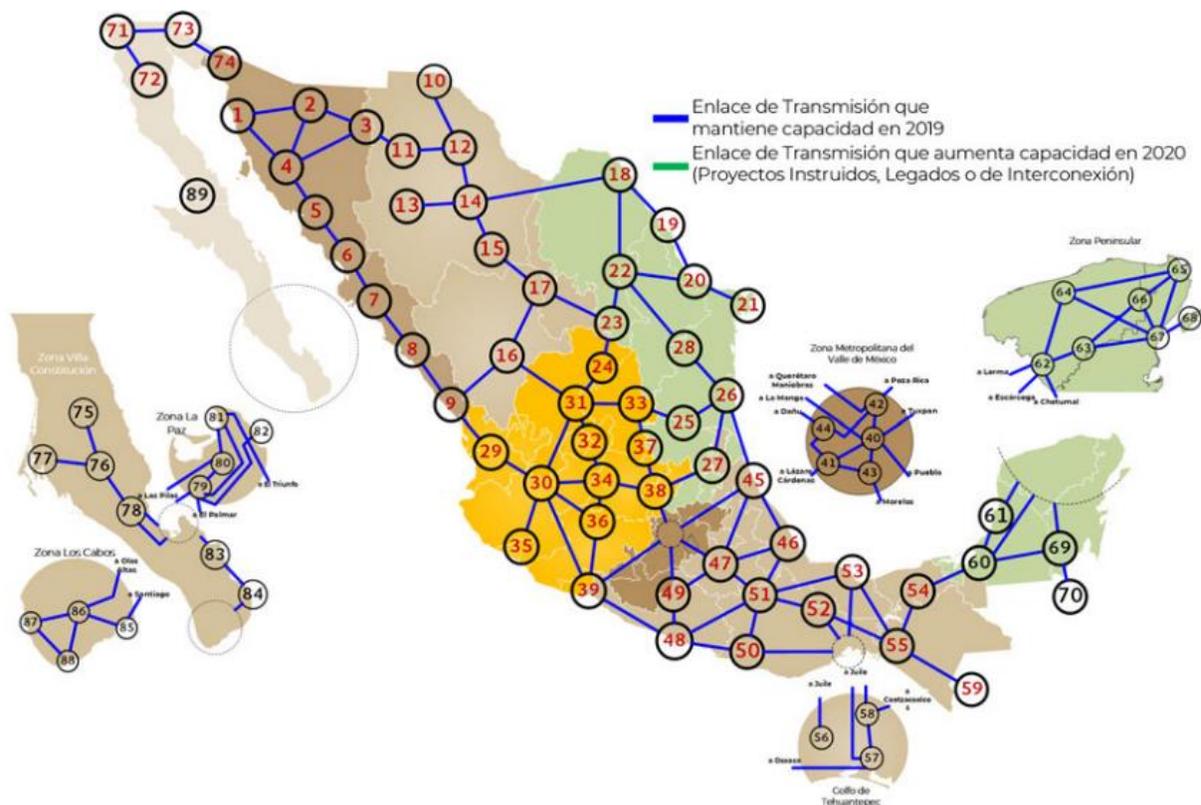


Figura 5 - Enlaces de Transmisión del SEN al 30 de abril del 2021

Fuente: PRODESEN 2021-2035 (SENER, 2021)

En la región del estado de Baja California Sur se cuenta con 4 zonas de transmisión correspondientes a Mulegé, La Paz, Los Cabos y Villa Constitución. Cabe decir que la zona correspondiente al municipio de Mulegé está asilada de las otras 3 zonas.

2) Capacidad Instalada

Baja California Sur cuenta al día 30 de abril del 2021 con una capacidad instalada de 1,070MW, lo que corresponde a un 1.2% respecto a la capacidad instalada del país la cual es de 89,479MW. En la Tabla 2 se muestra la capacidad instalada por tecnología al 30 de abril del 2021.

| Tabla 2 - Capacidad instalada en BCS al 30 de abril del 2021 | |
|--|---------------------------|
| Tecnología | Capacidad instalada en MW |
| Combustión Interna | 343 |
| Solar-FV | 79 |
| Geotérmica | 10 |
| Termoeléctrica convencional | 113 |
| Turbogás | 525 |
| Total | 1070 |

Fuente: Elaboración propia con datos del PRODESEN 2021-2035 (SENER, 2021)

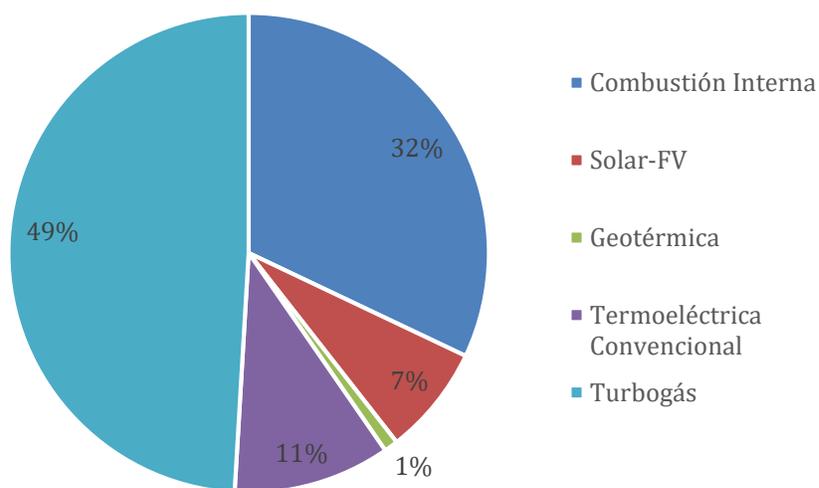


Figura 6 - Capacidad Instalada en BCS al 30 de abril del 2021

Fuente: Elaboración propia con datos del (PRODESEN 2021-2035)

De la Figura 6 podemos notar que respecto a las energías limpias sólo se produce un 7% de energía solar y un 1% de energía geotérmica, respecto a la capacidad instalada del estado.

3) Generación Eléctrica

Baja California Sur registra al 31 de diciembre del 2019 una generación anual de electricidad de 2.51 GWh como se muestra en la Tabla 3. México cuenta al día 31 de diciembre del 2019 con una generación anual de 317,820 GWh.

| Tabla 3 - Generación Bruta en BCS al 31 diciembre del 2019 | |
|--|------------------------|
| Tecnología | Generación Bruta en Wh |
| Combustión Interna | 1,657,765 |
| Solar-FV | 1,798 |
| Geotérmica | 55,168 |
| Termoeléctrica convencional | 563,265 |
| Turbogás | 199,718 |
| Total | 2,507,714 |

Fuente: Elaboración propia con datos proporcionados por la respuesta de CFE a la petición de transparencia con referencia UT/SAIP/1264/20 con folio 1816400095920 (CERCA, 2020)

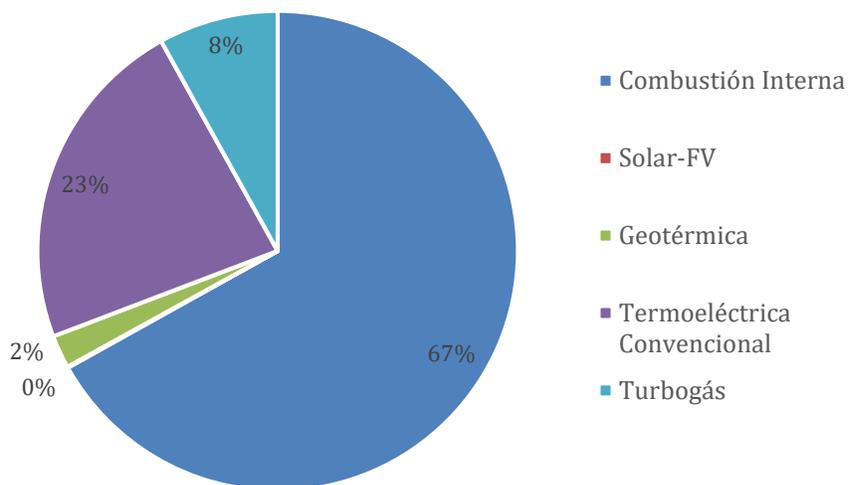


Figura 7 - Generación Bruta en BCS al 31 de diciembre del 2019

Fuente: Elaboración propia con datos proporcionados por la respuesta de CFE a la petición de transferencia con referencia UT/SAIP/1264/20 con folio 1816400095920 (CERCA, 2020)

De la Figura 7 podemos notar que respecto a las energías limpias sólo se genera un 0.06% de energía solar y un 2.64% de energía geotérmica, lo cual atañe a la generación en Baja California Sur.

4) Demanda Energética

En la Figura 8 se observa el perfil de la demanda máxima integrada semanal de 2018, 2019 y 2020 en el sistema interconectado de BCS. En esta gráfica se observa que en el 2020 la demanda máxima presentó una caída del 4.3% en agosto respecto al año 2019.

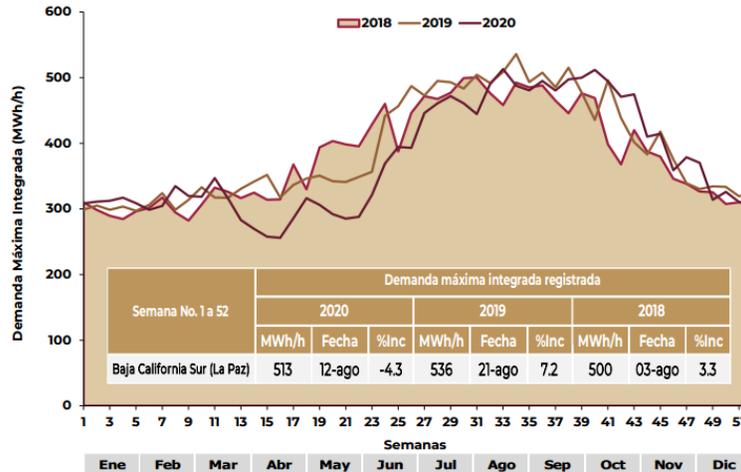


Figura 8 - Comportamiento de la demanda máxima integrada del sistema interconectado Baja California Sur 2018, 2019 y 2020

Fuente: PAMRNT 2021-2035 (CENACE, 2021)

En la Figura 9 se observa el perfil de la demanda máxima integrada semanal de 2018, 2019 y 2020 en el sistema interconectado Mulegé. Este pequeño sistema asilado alcanzó una demanda máxima integrada en el mes de agosto, con un aumento del 2.3% en relación con el 2019.

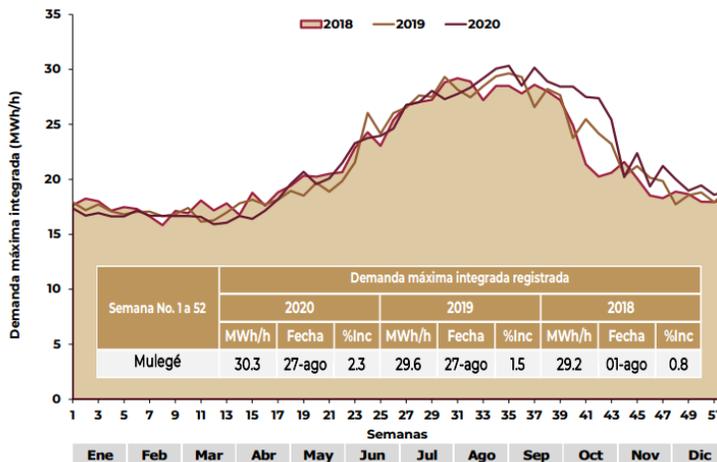


Figura 9 - Comportamiento de la demanda máxima integrada del sistema interconectado Mulegé 2018, 2019 y 2020

Fuente: PAMRNT 2021-2035 (CENACE, 2021)

Los perfiles son los característicos de la zona norte del país con incrementos notables entre mayo y septiembre. Cabe resaltar que en el caso del sistema interconectado de BCS se nota un gran decremento en ciertos meses por causas de la reducción de turismo a causa del SARS COVID-19.

5) Fallas eléctricas

Las últimas fallas eléctricas (apagones) registradas se presentan en el año 2019. De acuerdo con la CFE la energía no suministrada durante los periodos de las fallas eléctricas fue de 1,367.89MWh, del cual el 59% de los usuarios afectados fueron del municipio de La Paz. El total de apagones fueron 63, de los cuales 30 se produjeron por esquema de baja frecuencia y 33 por tiro manual. En la Tabla 4 se presenta la cantidad de gente afectada por municipio en BCS.

| Tabla 4 - Número de usuarios afectados por los apagones en BCS en 2019 | |
|---|-------------------------------|
| Municipio | No. Usuarios afectados |
| Comondú | 30,206 |
| La Paz | 124,849 |
| Los Cabos | 127,673 |
| Loreto | 8,553 |
| Mulegé | 23,101 |
| Total | 314,382 |

Fuente: Diagnóstico de Energía y Calidad del Aire en La Paz 2021 (CERCA, 2021)

E. Estado de la Calidad del Aire

1) Reglamentos y normatividades

Baja California Sur se basa en la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección del Ambiente (LGEEPA) y su Ley de Equilibrio Ecológico y Protección del Ambiente del Estado de Baja California Sur (LEEPAEBCS) como instrumentos normativos en materia de protección de la atmósfera y la gestión de la calidad del aire.

La LGEEPA es una Ley de orden público e interés social que tiene por objetivo:

- Garantizar el derecho de toda persona a vivir en un medio ambiente adecuado para su desarrollo, salud y bienestar.
- Definir los principios de la política ambiental y los instrumentos de aplicación.
- La prevención de la contaminación del aire, agua y suelo.

La LEEPAEBCS es una Ley del estado de BCS de orden público e interés social que tiene por objetivo:

- Establecer la concurrencia del estado y los municipios para definir los principios de la política ecológica y reglamentar los instrumentos para su aplicación.

- Determinar acciones para la preservación, restauración y mejoramiento del ecosistema, así como la prevención y control de la contaminación de la atmósfera, el agua y el suelo.

2) Monitoreo

Actualmente el monitoreo de la calidad del aire en BCS es manejado por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) que cuenta con tres estaciones de monitoreo ubicadas en el municipio de La Paz, en dichas estaciones se mide con equipo continuo Bióxido de Azufre (SO₂), Bióxido de Nitrógeno (NO_x) y Ozono (O₃); y con equipo manual se miden partículas menores o iguales a 10µm. Estas estaciones se ubican: la Estación 1 (E1) en el lado norte de la CT Punta Prieta, la Estación 2 (E2) y la Estación 3 (E3) en la zona urbana de la Ciudad de La Paz (Ver Figura10).

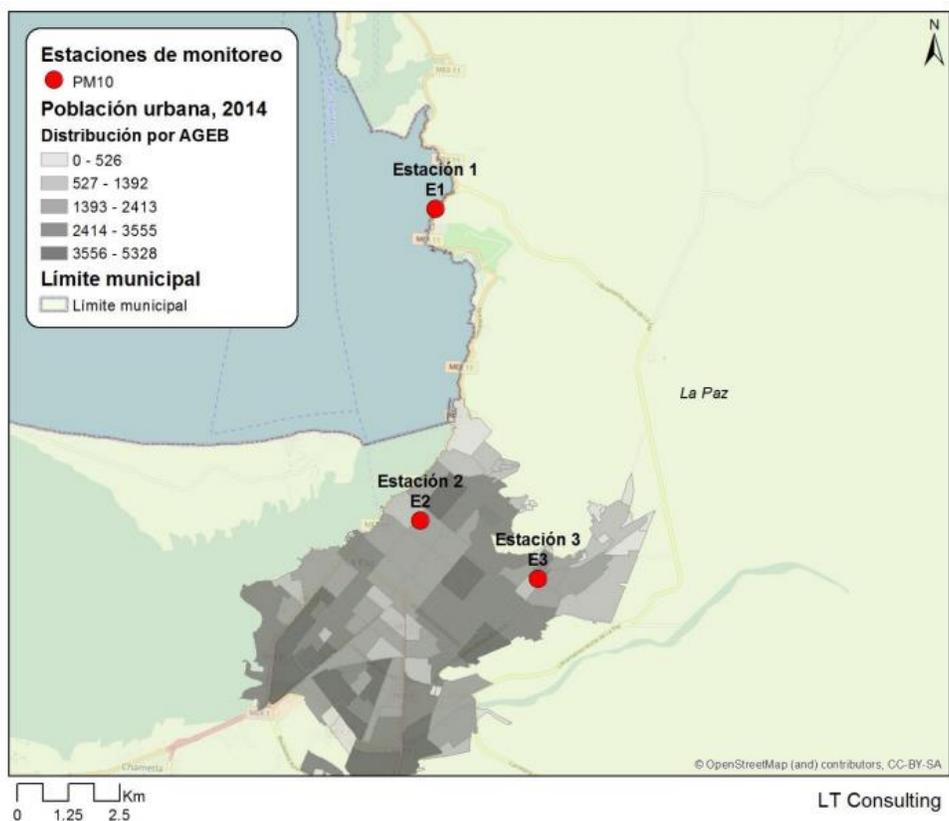


Figura 10 - Ubicación de las Estaciones de Monitoreo en BCS

Fuente: PROAIRE 2018-2027 (SEMARNAT, 2019)

3) Emisiones

Las emisiones contaminantes en BCS han presentado un aumento relevante en un corto periodo, contrario a las tendencias nacionales e internacionales en emisiones por fuentes fijas. Esto se muestra en la Figura 11, en la cual se muestra el incremento de las emisiones contaminantes de la Central Termoeléctrica y Central de Combustión Interna en La Paz. Si bien se observa una reducción en el 2019, esto se puede deber a los apagones ocurridos ese año.

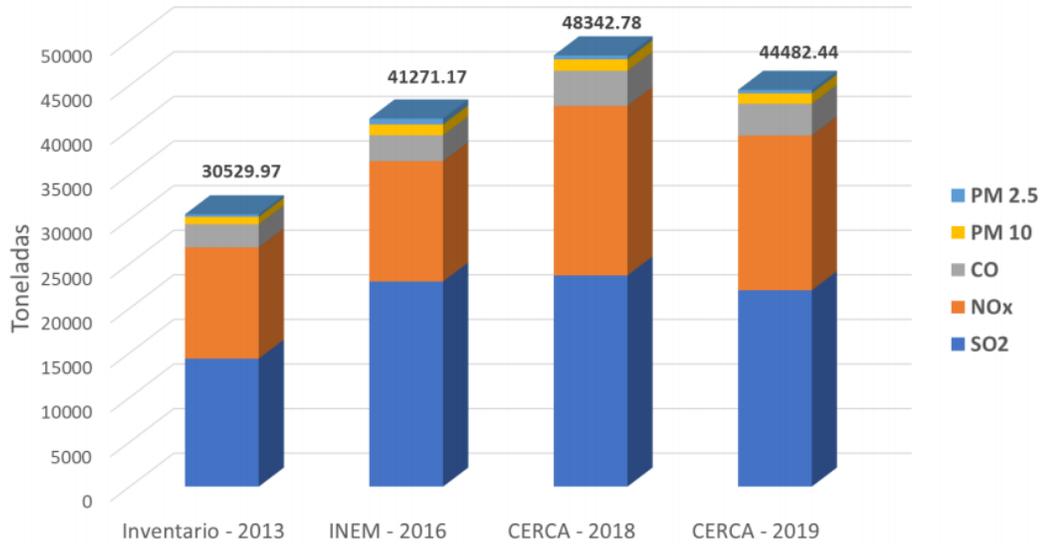


Figura 11 - Evolución de contaminantes criterio por fuentes fijas en La Paz, BCS

Fuente: Diagnóstico de Energía y Calidad del Aire en La Paz 2021 (CERCA, 2021)

De estas dos centrales, la central CCI BCS es la mayor responsable de las emisiones contaminantes, lo cual está relacionado con su capacidad de generación, ya que genera el 45% del total de la energía eléctrica de BCS. Los contaminantes predominantes son el Dióxido de Azufre (SO₂) y los Óxidos de Nitrógeno (Ver Figura 12).

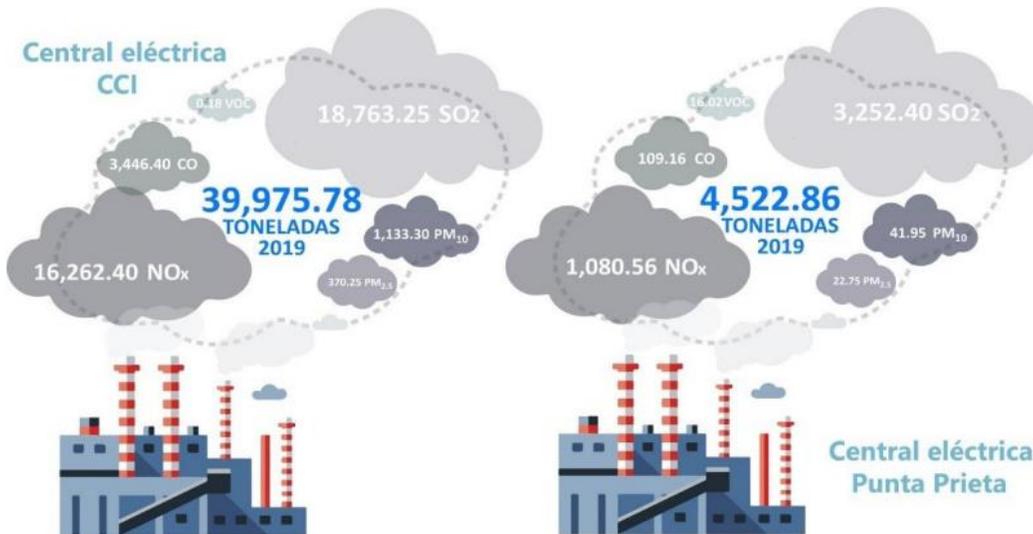


Figura 12 - Emisiones de contaminantes criterio por las centrales eléctricas en La Paz 2019

Fuente: Diagnóstico de Energía y Calidad del Aire en La Paz 2021 (CERCA, 2021)

En las Tablas 5 y 6 se presentan las emisiones contaminantes en los años 2018 y 2019 respectivamente, contando con los contaminantes de CO₂ y el GEI (CO₂, CH₄, N₂O). Nota: 1Gg equivale a 1,000 Toneladas.

temperaturas y escasa precipitación pluvial que en promedio anual es de 180 mililitros. Fenómenos como la desertificación, combinado con el tipo de lluvias que se presentan en la entidad, de tipo torrencial asociadas a eventos ciclónicos y aunados a la orografía de la península de Baja California Sur, ocasionan que el aprovechamiento natural del recurso hídrico sea muy limitado. Del agua concesionada en el estado al 30 de junio de 2021, el 62% corresponde al uso agrícola que concentra el mayor volumen, en contraste con el doméstico y público urbano, que juntos suman apenas el 8.3%. Por esto, el déficit de la infraestructura de retención indispensable, así como la falta de medición provoca deficiencias en el aprovechamiento óptimo y eficiente del agua superficial producto de avenidas extraordinarias. El agua subterránea representa la principal fuente de abastecimiento para todos los usos que clasifica la Ley de Aguas Nacionales, con 90.7% del volumen total explotado por año. De estos, existen 39 acuíferos en el estado, 19 con disponibilidad negativa, en 7 la explotación es mayor a su recarga media anual con un balance deficitario y 9 están sobre explotados.

CONAGUA en su Registro Público de Derechos de Agua (REPDA), al 30 de junio de 2020 reporta que los usos del agua subterránea en el estado son explotados con los fines mostrados en la Figura 14:

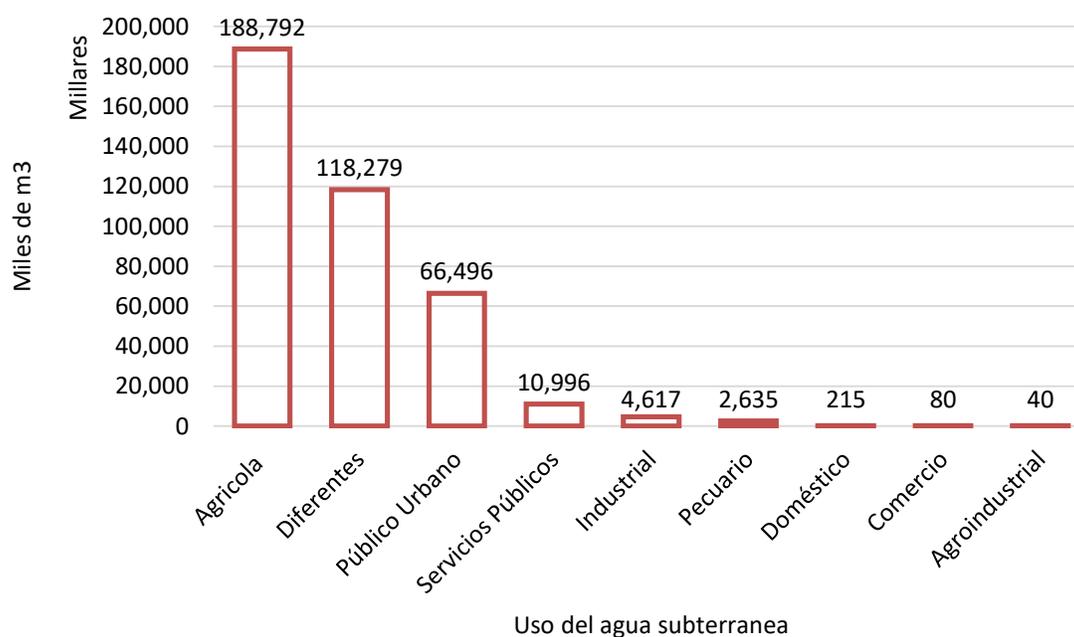


Figura 14 - Volumen de explotación [m³]

Fuente: Plan Estatal de Desarrollo de Baja California Sur, 2021-2027 (GBCS, 2021).

En cuanto al uso y disponibilidad de los recursos hídricos es conveniente señalar que las aguas superficiales que escurren durante la época de lluvias no son aprovechadas por falta de infraestructura en presas, ya sea para la recarga artificial de acuíferos o para abastecimiento.

Referente a la infraestructura hidráulica, actualmente es insuficiente considerando que existen únicamente 6 presas en todo el estado y sólo una es utilizada como fuente de

abastecimiento adicional, mientras que las restantes cumplen funciones de control de avenidas o infiltración.

Como fuentes de abastecimiento alternas a las aguas subterráneas, el municipio de Los Cabos cuenta con una desalinizadora con capacidad instalada de 250 litros por segundo y una capacidad superficial en la presa San Lázaro que es potabilizada y suministrada a la red municipal.

Según la página web “Proyectos de México” del gobierno de México, para finales del 2021 se lanzó un proyecto para la construcción de una planta desalinizadora en el municipio de La Paz la cual tiene como objetivo generar 200-250 litros por segundo. Cabe mencionar que aún se encuentra en etapas de preparación e inversión, esperando estar en funcionamiento para el 2022.

III. SMALL MODULAR REACTORS

A. Introducción

En este capítulo se explicará el concepto de los NES (Nuclear Energy System) de carácter SMR (Small Modular Reactor), los tipos de tecnologías que existen y algunas aplicaciones alternas a la generación eléctrica.

Así mismo, se presentarán los cuatro SMRs seleccionados como objeto de estudio tomando en cuenta los parámetros impuestos por la nación, considerando también diferentes diseños, tecnologías, capacidades de generación, etc., lo cual proporciona diferentes escenarios a evaluar en el siguiente capítulo.

B. La Energía Nuclear

La energía nuclear es una fuente de energía que se produce por fisión (cuando los núcleos de los átomos se dividen) o por fusión (cuando los átomos se fusionan). La fisión nuclear, la cual es la utilizada actualmente, es una reacción en la cual un núcleo de un átomo se divide en dos o más núcleos pequeños, liberando energía simultáneamente (ver Figura 15). Cada que se produce esta reacción se libera energía en forma de calor y radiación. Ese calor puede ser transformado en electricidad en una central nucleoelectrica en un proceso similar a las plantas de generación termoeléctrica de combustibles fósiles.

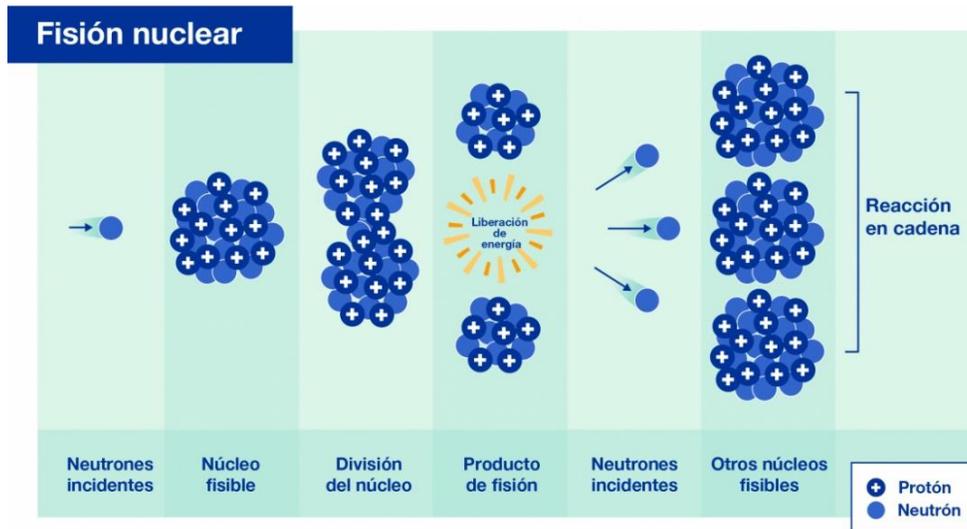


Figura 15 - Fisión Nuclear

Fuente: ¿Qué es la energía nuclear?, La ciencia de la energía nucleoelectrica. (OIEA, 3/11/2021)

Dentro de las centrales nucleoelectricas se controla la reacción en cadena, por lo general alimentadas por Uranio-235, a fin de producir calor mediante fisión. El calor aumenta la temperatura del refrigerante del reactor, que suele ser agua, para producir vapor. Este vapor se encauza para hacer girar unas turbinas, que activan un generador eléctrico con el que se produce electricidad con bajas emisiones de carbono.

C. Small Modular Reactors

Las plantas nucleoelectricas se clasifican en tres tipos dependiendo de su capacidad de generaci3n (ver Figura 16):

- Reactores convencionales: Son los t3picos reactores grandes, por lo que proporcionan energ3a a partir de los 700MWe o m3s.
- Reactores modulares peque1os: Los Small Modular Reactors (SMR), traducido del ingl3s “Reactores Modulares Peque1os”, son reactores peque1os con una capacidad de potencia que alcanzan hasta 300MWe por unidad.
- Micro-reactores: Son reactores generalmente utilizados para investigaci3n que generan por lo general hasta 10MWe. Los Micro-reactores son considerados un subgrupo de los SMRs.



Figura 16 - Clasificaci3n de los reactores nucleares

Fuente: ¿Qu3 son los reactores modulares peque1os (SMR)? (OIEA, 3/12/2021)

Los SMRs est3n vinculados a la naturaleza de su dise1o, es decir, son peque1os y modulares. Dado su tama1o, 3stos pueden ser colocados en lugares donde usualmente no se podr3a colocar una planta nuclear tradicional. Tambi3n, a diferencia de las plantas tradicionales, los m3dulos pueden ser prefabricados para luego ser enviados e instalados in situ. Estas caracter3sticas proporcionan una mayor asequibilidad, aparte de que sus sistemas de seguridad pueden estar dise1ados respecto a su dise1o volvi3ndolos a3n m3s seguros y manejables. Otra caracter3stica que tienen es que requieren poca necesidad de combustible, por lo que pueden requerir una recarga cada 3 a 7 a1os, aparte de tener una vida 3til de 30 a 60 a1os.

Dentro de los SMRs existen varios tipos de reactores, de entre los que se evaluar3n dentro de esta investigaci3n tenemos los siguientes tres:

- PWR (Pressurized Water Reactor): Los reactores de agua presurizada cuentan con dos circuitos: un circuito primario por el que circula agua en estado l3quido y a alta presi3n del n3cleo del reactor hacia los generadores de vapor donde est3 presente el circuito

secundario. En el circuito secundario circula agua que se convertirá en vapor para poder accionar las turbinas para la generación eléctrica.

- BWR (Boiling Water Reactor): Los reactores de agua en ebullición, a comparación de los PWR, cuentan con un circuito en el cual es el mismo fluido refrigerante el que circula por el núcleo del reactor y las turbinas.
- MSR (Molten Salt Reactor): Los reactores de sal fundida producen energía de fisión en combustible de sal fundida en circulación con un reactor de espectro epitermal y un ciclo de combustible con reciclado de actínidos completo. En estos sistemas, el combustible es una mezcla de sodio, zirconio y fluoruros de uranio líquido. El calor generado en la sal fundida se transfiere a un sistema de refrigeración secundario a través de un intercambiador de calor intermedio y luego a través de un intercambiador de calor terciario al sistema de conversión de energía. El sistema tiene una temperatura de salida del refrigerante de 700°C, posiblemente hasta 800°C, lo que mejora la eficiencia térmica.
- HTGR (High Temperature Gas Reactor): Los reactores de alta temperatura enfriados por gas, son reactores que pueden operar a muy altas temperaturas de hasta 1,000°C y se refrigeran por gas moderado con grafito a través de un único paso. Existen dos tipos de reactores: los reactores de bloque prismático (PMR) que cuentan con una configuración de núcleo de bloque prismático, en la que los bloques de grafito hexagonales se apilan para encajar en un recipiente de presión cilíndrico, y los reactores de lecho de guijarros (PBR) que consisten en combustible en forma de guijarros apilados dentro de un contenedor cilíndrico a presión.

D. El estado de la energía nuclear

1) Generación a nivel mundial

A diciembre del 2020, según la OIEA, existen en operación alrededor de 443 reactores nucleares en un total de 35 países, produciendo cerca del 10% de la energía eléctrica mundial correspondiente a 2,735.52TWh. Así mismo, están en construcción 54 reactores.

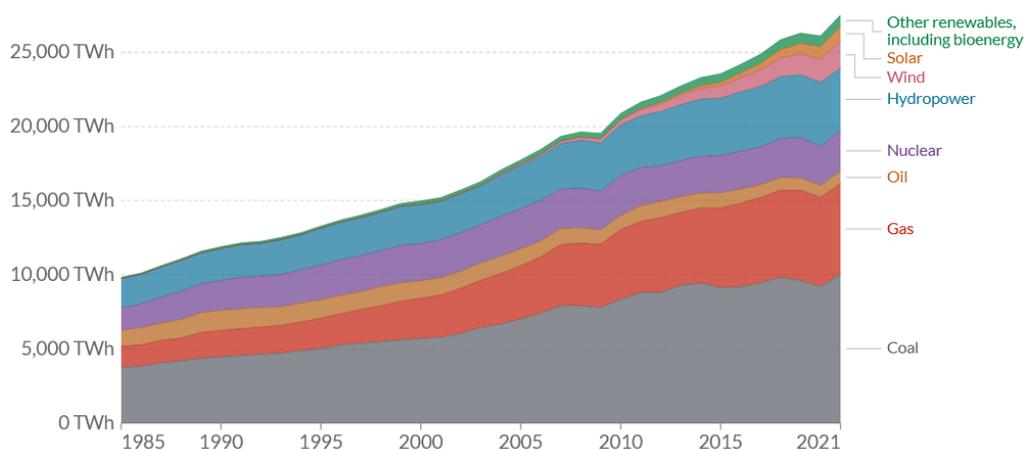


Figura 17 - Electricidad producida por fuente en el mundo

Fuente: Electricity Mix (Our World in Data based on BP Statistical Review of World Energy, Ember Global Electricity Review (2022) & Ember European Electricity Review (2022))

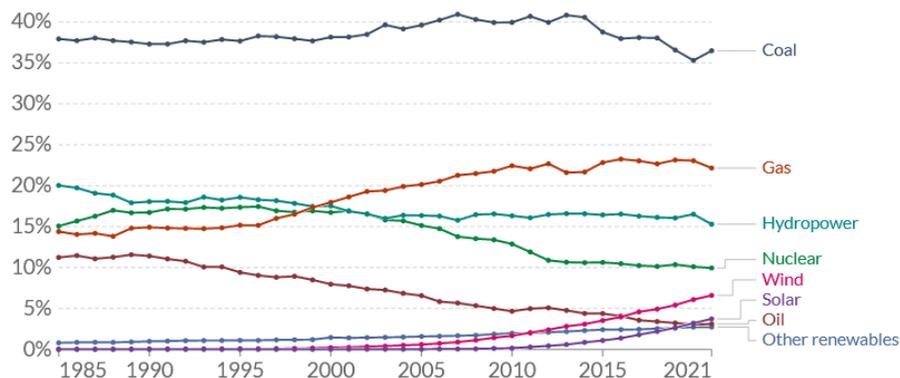


Figura 18 - Participación en la producción de electricidad por fuente en el mundo

Fuente: Electricity Mix (Our World in Data based on BP Statistical Review of World Energy & Ember)

En la Unión Europea (UE), 13 de los 27 estados miembros cuentan con centrales nucleares, con un total de 181 reactores en operación, los cuales producen cerca del 26% del total de la energía consumida. En África hay 2 reactores en operación, en América hay 120 reactores en operación y en Asia hay 140 reactores en situación de operar. Así mismo al 31 de diciembre del 2020, se tenían contemplados 31 reactores en construcción.

En las Figuras 17 y 18 se observa la participación y la producción por tecnología eléctrica en el mundo al año 2021.

2) Generación a nivel nacional

En México, la producción de energía nuclear corresponde al 1.9% de la generación nacional total correspondiente a 6,504MW (ver Figura 19), siendo producida por la planta nucleoelectrica de Laguna Verde, Veracruz la cual cuenta con 2 reactores BWR-5 de General Electric con capacidad de 820MW cada una, dando una capacidad instalada de 1640MW. La planta inició construcción en el año 1976, comenzando su operación el primer reactor en 1990 y el segundo en 1995. Actualmente se renovaron las licencias de operación de las dos unidades, la primera para operar hasta 2050 y la segunda para operar hasta 2055.

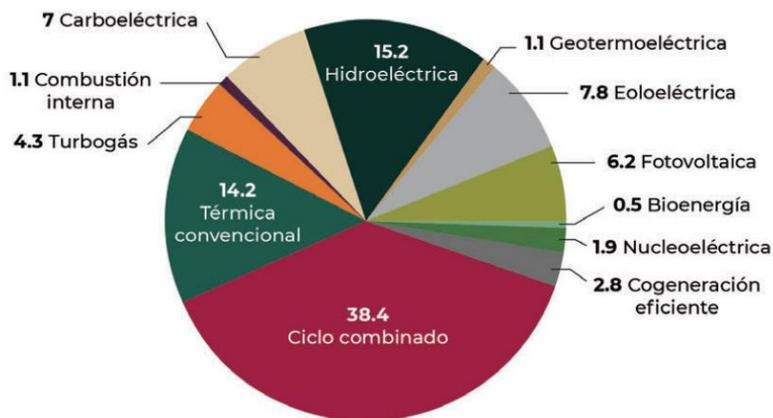


Figura 19 - Porcentaje de la capacidad instalada por tipo de tecnología al 31 de Diciembre del 2020

Fuente: PRODESEN 2021-2035 (SENER, 2021)

3) Opinión pública y Aceptación a nivel mundial

La energía nuclear para su implementación requiere en gran medida de la aceptación de la población de la región involucrada, aparte de otros factores políticos y de activismo social. La opinión pública tiene gran peso debido a los peligros que conlleva para la salud y el medio ambiente y a los antecedentes más remarcables de la historia en relación con la energía nuclear como son: los bombardeos atómicos sobre Japón en 1945 en la Segunda Guerra Mundial, el incidente de Chernobyl en Pripyat, Ucrania en 1986 y el incidente en Fukushima en 2011 causado por un desastre natural.

Estos antecedentes han hecho que la industria de la energía nuclear enfoque sus esfuerzos no sólo en la eficiencia de sus plantas, si no en sus protocolos y sistemas de seguridad, control y acción en caso de desastre, así como los protocolos de manejo de desechos radioactivos. A pesar de esto, la desinformación general de la población no ha permitido un total avance de esta parte de la industria eléctrica. A continuación, se muestra la opinión pública acerca de la energía nuclear en algunos países obtenida en el estudio “An International Analysis of Public Acceptance of Nuclear Power” realizado por el Economic Research Institute of Asean and East Asia en el año 2018.

- En Japón, Japan Atomic Energy Relations Organization (JAERO) ha realizado censos de opinión pública de forma periódica desde el 2006. Para el 2017, los resultados lanzados fueron mayormente negativos describiendo la energía nuclear como peligrosa, insegura, compleja y difícil de entender, mientras que del lado positivo solo se tuvo una opinión de ser benéfica y necesaria. Dentro de los resultados también se determinaron 3 factores importantes tras haber ocurrido el incidente en Fukushima Daiichi:
 - La opinión pública que era relativamente aceptable decayó.
 - Conforme el tiempo ha pasado las nuevas generaciones van cambiando de idea y aceptando la energía nuclear nuevamente.
 - El nivel de aceptación por la población depende de su grado de conocimiento sobre el tema. A mayor conocimiento los resultados tienden a ser positivos.
- En Estados Unidos se realizó un censo de aceptación en 2016 a 1000 adultos por US Nuclear Energy Institute. Parecido a Japón, después del incidente de Fukushima la aceptación decreció, pero posteriormente volvió a los niveles previos al incidente. También se encontró que las opiniones mayormente favorables corresponden a la población que está “bien informada”, mientras que los opositores son los menos informados. Cabe mencionar que la cantidad de personas informadas son una minoría con respecto a aquellas que no están pobremente informadas. Posterior al incidente de Three Mile Island, los Estados Unidos fundaron el Instituto de Operaciones de la Energía Nuclear (INPO) para expandir las campañas de seguridad además de realizar congresos y demás actividades para reganar la confianza pública. La Asociación Mundial de Operadores Nucleares (WANO), es una organización internacional fundada en 1986 posterior al accidente de la central nuclear de Chernobyl con el propósito de promover la cooperación y excelencia profesional de la industria nuclear.

- En Reino Unido, se realizó un estudio de aceptación posterior al incidente de Fukushima, dando como resultado una constante positiva. Los que apoyan mayormente son hombres y personas en edades de 65 años o más.
- En Finlandia, se realizó un estudio por la empresa Gallup de EEUU posterior al incidente de Fukushima, mostrando una disminución en las respuestas positivas previas al incidente, aun así se obtuvieron respuestas mayormente positivas. Esto demostró que Finlandia permanece como un país pronuclear, esto debido a su estabilidad en los cimientos geológicos del país, al hecho de que las centrales nucleares hayan seguido funcionando de forma fiable, que se haya ganado la confianza del público, el aumento de las importaciones de energía y demanda, amplia divulgación y consultas públicas sobre nuevas construcciones basadas en el reconocimiento de la necesidad de cumplir con estándares del protocolo de Kioto.
- En la República de Corea, durante los años 2017-2018 se realizaron propuestas para comenzar a dejar de usar la energía nuclear y dejar su dependencia. A través de consulta ciudadana se realizaron debates y encuestas públicas involucrando gente con conocimientos en el tema donde se determinó que un 59.5% de la opinión pública está a favor de la energía nuclear y el 40.5% se encontró en contra. Cabe decir que estas encuestas se realizaron para saber si se detenía la construcción de los módulos 5 y 6 para la planta Shin Kori.

Aunque los resultados de las encuestas varían considerablemente según el método de investigación, las preguntas y otros factores, está claro que la opinión pública ha tenido un impacto significativo en las políticas de la energía nuclear de cada país. Las historias de éxito en Occidente subrayan que los continuos esfuerzos de los operadores de los reactores para mejorar la seguridad es un requisito previo para tal éxito, mientras que cada gobierno debe promover políticas energéticas de manera responsable. Además, la cooperación entre el gobierno y el sector privado en la difusión de información ayuda a ganar la comprensión de los ciudadanos. Los datos también muestran que si el gobierno mantiene una política consistente y los ciudadanos reciben información adecuada, mejorará la aceptación de la energía nuclear. Por lo tanto, es importante difundir información sobre políticas y proporcionar información de manera continua y consistente. Es más, la información difundida no sólo debe enfatizar los aspectos técnicos o la seguridad de la energía nuclear, sino también explicar el porqué es necesaria la energía nuclear.

4) Opinión pública y Aceptación a nivel nacional

En México, al igual que en los países mencionados anteriormente, la opinión pública se vuelve negativa ante desastres del tipo nuclear. En Veracruz, tras el incidente de Chernóbil, se conformó un grupo llamado “Madres Veracruzanas” para tratar de detener la construcción de la Central Nuclear Laguna Verde. De igual manera, tras el desastre de Fukushima Daiichi, la opinión pública que era relativamente aceptable se volvió mayormente negativa, aunque con el tiempo la opinión pública parece haber vuelto a la tendencia base como se muestra en la Figura 20.

Similar a la tendencia mundial, la opinión pública negativa tiende a darse principalmente por la desinformación o la mala publicidad que se le ha dado a la energía nuclear que en conjunto a los incidentes previamente mencionados mantienen a la gente con el miedo de las

repercusiones aparte del miedo a la radiación y el manejo de los residuos de combustible nuclear.

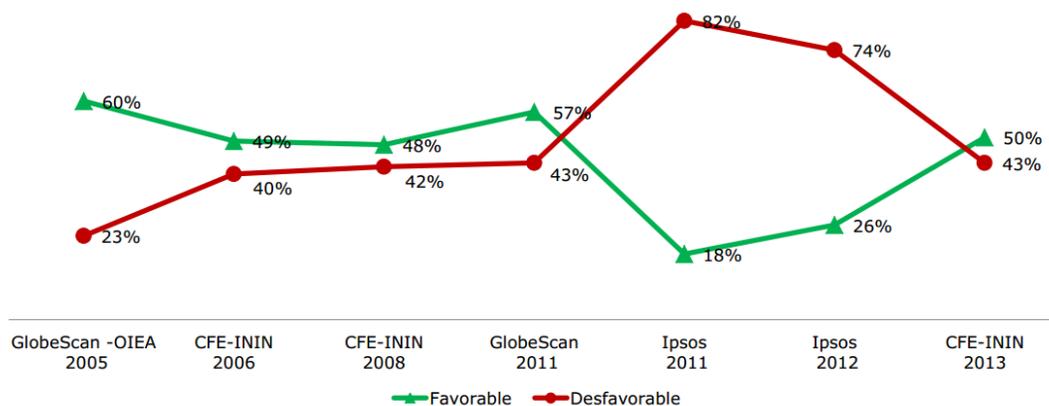


Figura 20 - Evolución del apoyo al uso de reactores nucleares para generar electricidad en México

Fuente: “Los retos de las Energías Limpias en el mediano y largo plazo: Energía Nuclear”. Elaborado con datos del ININ y GlobeScan e Ipsos MORI. (Academia de Ingeniería México, 2019)

E. Objetos de estudio

Los SMRs tomados para objeto de estudio fueron seleccionados usando el listado de SMRs en desarrollo alrededor del mundo, proporcionado por la OIEA (Organización Internacional de Energía Nuclear) en el documento “Advances in Small Modular Reactor Technology Developments” siguiendo los siguientes criterios:

- Parámetros, necesidades y requerimientos del PRODESEN/Gobierno de México:
 - México sigue las regulaciones nucleares del país de origen de la planta nuclear que posee (Art. 27 de la Constitución Mexicana). Actualmente la CNSNS (Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias) aplica el 10CFR50 dado que México construyó y opera en Laguna Verde, Veracruz, un GE-BWR de origen estadounidense.
 - Se asume que la industria nuclear en México no busca desarrollar tecnología, o al menos no tiene planes de acción concretos.
 - Se asume que la CFE preferiría no utilizar un FOAK (First Of A Kind) SMR porque en el pasado seleccionó un BWR considerado que en su momento eran los diseños que contaban con mayor experiencia operacional en EEUU.
 - La ley mexicana requiere que se le informe a la población afectada, así como de proveer información clara del proceso.
 - Como se mencionó en el capítulo 2 “El estado energético de Baja California Sur”, BCS está aislado del SEN (Sistema Eléctrico Nacional), por lo que se tratará de evitar la dependencia de BCS al SEN.
- Criterios adicionales considerados en este estudio de selección de SMRs para México:
 - Se deberán considerar diferentes tecnologías.

- Deberán de estar en etapas finales de desarrollo o terminados.
- Su procedencia debe ser de países con experiencia en el desarrollo de la energía nuclear.

Una vez establecidos los parámetros de selección, los cuatro SMRs seleccionados para objeto de estudio son: VOYGR-12 (NuScale), Integral MSR (Terrestrial Energy), Xe-100 (X-Energy) y BWRX-300 (GE Hitachi). A continuación, se presentarán sus características.

1) NuScale – VOYGR-12

El “VOYGR-12” es una planta nuclear integrada por 12 módulos de tipo PWR desarrollado por la compañía estadounidense NuScale. Esta planta, aunque es de 12 módulos, tiene diferentes escalabilidades según los requerimientos del usuario final, existiendo plantas de 4 módulos (308MW), 6 módulos (462MW) o 12 módulos (924MW). Cada módulo tiene una potencia eléctrica de 77MWe y una potencia térmica de 250 MWt.

NuScale propone innovaciones tecnológicas en el diseño del VOYGR de modo que:

- Cuenta con sistemas de seguridad y auto enfriado pasivos, esto refiere a que no necesita de un operador, fuentes de AC o DC, o agua adicional para realizar su funcionamiento en caso de alguna falla.
- Generadores de vapor de bobina helicoidal, la cual proporciona una gran superficie de transferencia de calor en un volumen pequeño maximizando el flujo de circulación natural en el circuito primario, resultando en una buena eficiencia térmica.
- Contención de acero de alta resistencia sumergida en la piscina de enfriamiento, y mantiene la contención en vacío limitando el intercambio de calor durante el funcionamiento normal minimizando la pérdida de calor del reactor, limitando el contenido de oxígeno, previniendo la corrosión de los componentes y eliminando el requisito de aislamiento físico de la vasija del reactor.
- El diseño del núcleo, al ser pequeño y eficiente, ocupa 1/20 parte de combustible respecto a un reactor común de gran escala, por lo que la radiación causada por combustible dañado se encuentra bajo los límites reglamentarios.
- Se cuenta con un sistema de control e instrumentación digital de matriz de compuerta programable que brinda monitoreo y control completo de todos los sistemas de la planta en una sola sala de control.

Aparte de sus características técnicas de generación, el “VOYGR” ofrece otros beneficios entre los que encontramos:

- Los reactores, dado su pequeño y compacto tamaño tienen la posibilidad de ser prefabricados y ensamblados en fábrica, transportados e instalados in situ.
- Tiene la flexibilidad de destinar algunos de los módulos para procesado químico, como: desalinización del agua, producción de gas sintético o producción de hidrógeno. Así mismo los módulos pueden actuar de forma conjunta o independiente según sea necesario.

- Los estudios de NuScale de costos de capital, operación y desmantelamiento, también conocido como LCOE (Levelized Cost of Energy), para el VOYGR-12 se encuentra en el rango de \$40/MWh a \$65/MWh.
- Su capacidad de reducción en las emisiones de carbono puede producir suficiente energía para 40,000 coches eléctricos o cerca de esa cantidad en combustible a base de Hidrógeno, planteado en Estados Unidos. Esto supone una reducción estimada de 200,00 toneladas de CO₂ de emisión por año. En el caso del VOYGR-6, acoplada a una refinería de 230,000 de barriles diarios, puede reducir un 40% de las emisiones totales de la planta. (175MT/h de CO₂). El VOYGR-12 puede producir energía eléctrica libre de carbono para alrededor de 700,000 hogares en Estados Unidos, esto puede reducir 8 millones de toneladas de CO₂ de emisión por año.
- Su consumo de agua tiene una eficiencia aproximadamente de 740gal/MWh, que corresponde a otras centrales nucleares y termoeléctricas a gran escala. Así mismo, puede ser enfriado por aire, en caso de que en el lugar de asentamiento se tenga agua limitada.

En la Figura 21 NuScale muestra la composición y estructura de su reactor modular pequeño integrado dentro de las plantas VOYGR:

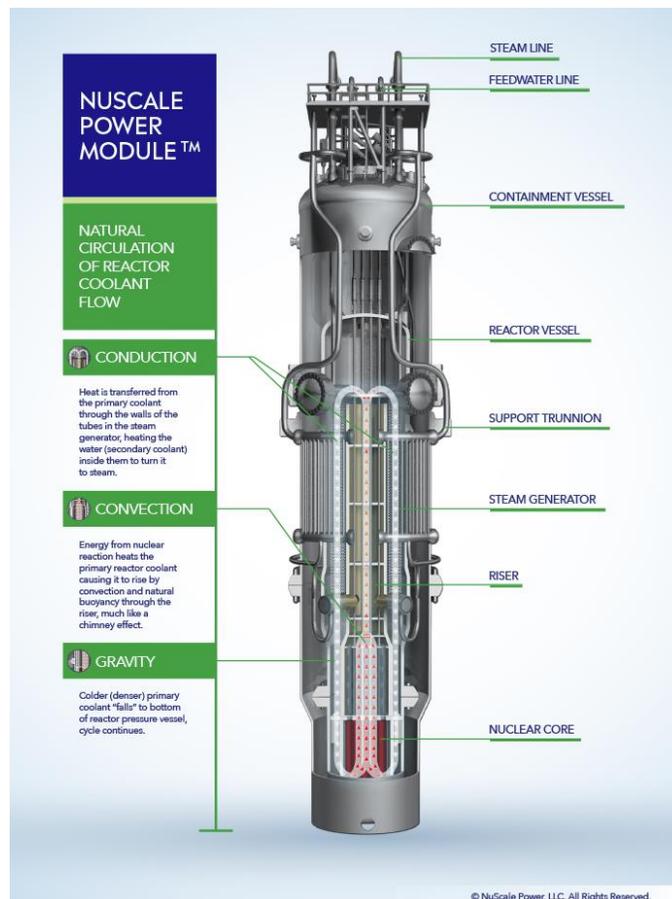


Figura 21 - SMR de NuScale

Fuente: Benefits, Smarter and simpler by design (NuScale Website)

Actualmente NuScale está presente en el “Proyecto de energía libre de carbono” (CFPP) el cual plantea la construcción de su primera planta nuclear consistente de 6 módulos VOYGR en Idaho Falls, Estados Unidos, a espera que su primer módulo entre en operación a mediados del 2029 y los restantes a partir del 2030. Así mismo, NuScale y la empresa energética rumana Societatea Nationala Nuclearelectrica SA firmaron un acuerdo de colaboración en Noviembre del 2021 durante la COP26 para evaluar el despliegue de una central eléctrica de 6 módulos VOYGR en Rumania.

En la Tabla 7 se presentan las características más importantes del VOYGR-12 con datos proporcionados por NuScale:

| Tabla 7 - Características del VOYGR-12 | | |
|---|---|--|
| Característica | Descripción | Unidad |
| Costo Nivelado de Energía (LCOE) | El LCOE contempla para esta planta los costos de capital, operación y desmantelamiento. | 40-65[\$/MWh] |
| Potencia Eléctrica | La planta “VOYGR-12” cuenta con 12 módulos con una potencia de 77MWe cada uno. | 924[MWe] |
| Potencia Térmica | La planta “VOYGR-12” cuenta con 12 módulos con una potencia de 250MWt cada uno. | 2400[MWt] |
| Tiempo de vida operacional | Tiempo de operación desde su encendido a su apagado. | 60[Años] |
| Ciclo de reabastecimiento de combustible | El ciclo de reabastecimiento de combustible es de hasta 24 meses con combustible de U235 enriquecido a menos del 5%. | 2[Años] |
| Desalinización del agua | Un módulo “VOYGR” acoplado a una desalinizadora de agua puede ayudar a producir agua potable. | 77[Mgal/d] |
| Procesado químico | Un módulo “VOYGR” acoplado a planta de producción de hidrógeno puede ayudar a producir hidrógeno. | 2053[kg/h] |
| Impacto de Descarbonización | Emisiones de gases de efecto invernadero (CO ₂). | 15[g/kWh] |
| Uso de suelo | Suponiendo una producción de 1GWe, se propone que para producir esa cantidad de energía se requiere de 0.14 millas cuadradas de uso de suelo. | 0.36[km ²] |
| Empleados para construcción | Considerando el “VOYGR-12”, el personal requerido para su construcción. | 1,600[Empleados] |
| Empleados para operación | Considerando el “VOYGR-12”, el personal requerido para su operación. | 270[Empleados] |
| Madurez tecnológica | Etapas de la tecnología entre su planteamiento conceptual hasta su puesta en operación. | Licencia de operación y planes de implementación |
| Tiempo de construcción | Se contempla un tiempo de construcción de 36 meses. | 3[Años] |

Fuente: Elaboración propia con datos proporcionados por la página web de NuScale (NuScale, 2021)

2) Terrestrial Energy – Integral MSR

El “Integral MSR” es una planta nuclear de tipo MSR desarrollada por la compañía Canadiense Terrestrial Energy. Esta planta cuenta con tecnología de la 4° generación dentro

de los reactores de sales fundidas, la cual es térmicamente más estable y eficiencia superior a aquellos reactores que utilizan agua como refrigerante. Esta planta cuenta con un único reactor que tiene una potencia eléctrica de 195MWe y una potencia térmica de 440MWt.

Terrestrial Energy propone en su diseño ciertas características particulares que lo hacen diferente a los típicos PWR, como son:

- Utiliza sal fundida como refrigerante y combustible ya que son térmicamente más estables, lo cual contrasta con los sistemas que utilizan agua circulante como sistema de refrigeración. Esto permite un funcionamiento a baja presión y alta temperatura, lo que reduce costos y mejora la eficiencia de generación eléctrica.
- Integra componentes primarios del reactor incluyendo el moderador de grafito, un núcleo de reactor sellado y reemplazable que tiene una vida útil operativa de 7 años en promedio. Mencionan que su reemplazo es simple y seguro de realizar.
- La unidad central admite factores de alta capacidad con una alta eficiencia de capital, dando como resultado una combinación de alta seguridad, alta producción de energía, simple operación, versatilidad y competitividad en costos necesaria para su despliegue.

El Integral MSR, a parte de la generación eléctrica, proporciona otros beneficios entre los que encontramos:

- El reactor del Integral MSR está diseñado para una construcción modular rápida, siendo prefabricado, transportado e instalado in situ.
- En los mercados de calor industrial, el Integral MSR tiene la capacidad potencial de producir hasta 600°C que, pueden ser utilizados para procesamiento químico generando gas natural, gas natural sintético, hidrógeno, amoníaco, desalinización del agua, entre otros. La energía térmica producida se puede transportar hasta 5km de distancia.

En la Figura 22 Terrestrial Energy muestra la estructura y conexión del Integral MSR:

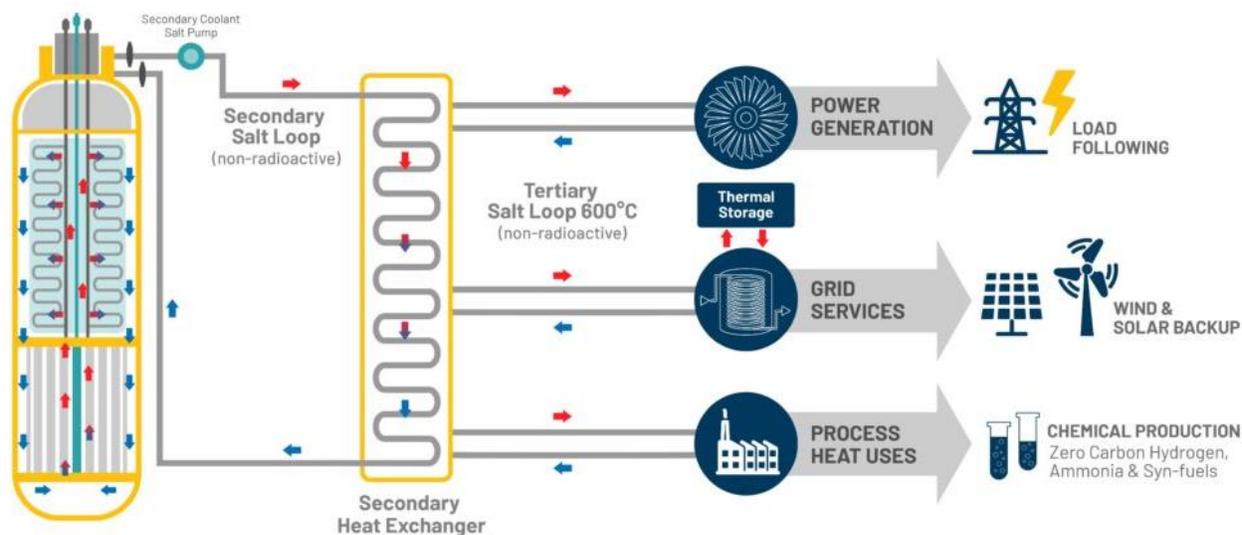


Figura 22 - SMR de Terrestrial Energy

Fuente: How it Works? (Terrestrial Energy Website)

Actualmente el Integral MSR ha completado la primera revisión técnica el día 7 de Junio del 2022 a cargo de la Comisión Canadiense de Seguridad Nuclear (CNSC) y la Comisión Reguladora Nuclear (NRC) de Estados Unidos.

A continuación, la Tabla 8 se presentan las características más importantes de datos proporcionados por Terrestrial Energy a cerca de su Integral MSR:

| Tabla 8 - Características del Integral SMR | | |
|---|---|---|
| Característica | Descripción | Unidad |
| Costo Nivelado de Energía (LCOE) | El LCOE contempla para esta planta los costos de capital, operación y desmantelamiento. | 50[\$/MWh] |
| Potencia Eléctrica | La planta "Integral MSR" cuenta con una potencia de 195MWe. | 195[MWe] |
| Potencia Térmica | La planta "Integral MSR" cuenta con una potencia de 440MWt. | 440[MWt] |
| Tiempo de vida operacional | Tiempo de operación desde su encendido a su apagado. | 50[Años] |
| Ciclo de reabastecimiento de combustible | El "Integral MSR" utiliza combustible estándar de U235 enriquecido a menos del 5%. Se especula un reabastecimiento cada 84 meses. | 7[Años] |
| Desalinización del agua | Dentro de la flexibilidad de operación del "Integral MSR", puede ayudar a procesado químico en producción de: desalinizadora de agua, hidrógeno, amoníaco, gas sintético, gas natural, entre otros. | - |
| Procesado químico | | - |
| Impacto de Descarbonización | Emisiones de gases de efecto invernadero (CO ₂). | 10[g/kWh] |
| Uso de suelo | Suponiendo una producción de 400MWe, se propone que para producir esa cantidad de energía se requiere de 7 hectáreas de uso de suelo. | 0.07[km ²] |
| Empleados para construcción | Considerando el "Integral MSR", el personal requerido para su construcción. | 2,100[Empleados] |
| Empleados para operación | Considerando el "Integral MSR", el personal requerido para su operación. | 580[Empleados] |
| Madurez tecnológica | Etapa de la tecnología entre su planteamiento conceptual hasta su puesta en operación. | Revisiones técnicas para obtener licencias de operación |
| Tiempo de construcción | Se contempla un tiempo de construcción de 48 meses. | 4[Años] |

Fuente: Elaboración propia con datos proporcionados por la página web de Terrestrial Energy (Terrestrial Energy, 2021)

3) X-Energy – Xe-100

El "Xe-100" es una planta nuclear de tipo HTGR con tecnología de la 4° generación desarrollada por la compañía Canadiense-Estadounidense X-Energy. El Xe-100 es escalable hasta un conjunto de cuatro módulos o incluso más según las necesidades, cada uno cuenta con una potencia eléctrica de 80MWe y una potencia térmica de 200MWt.

X-Energy propone en su diseño ciertas características tecnológicas diferentes de los reactores convencionales, como son:

- El núcleo del reactor está hecho de grafito y lleno de Triso-X” que es un combustible en forma guijarros (del tamaño de una bola de billar) enriquecido al 15.5% con recubrimiento altamente hermético. Los guijarros frescos se cargan en el reactor y se bombea helio a través del lecho de guijarros para extraer el calor y pasarlo a un generador de vapor que produce electricidad.
- El reactor se reabastece continuamente agregando guijarros frescos diariamente en la parte superior, ya que los más antiguos se descargan por la parte inferior del núcleo. Cada guijarro permanece en el núcleo durante poco más de tres años y circula a través del núcleo hasta seis veces para extraer la energía contenida. El combustible gastado se coloca directamente en barriles secos y se almacenan en el sitio, sin la necesidad de enfriamiento provisional o activo.
- Cuenta con un sistema de control y apagado de reactividad. El mecanismo de apagado principal es el fuerte coeficiente de temperatura negativo en todo el rango operativo. El sistema de control de reactividad proporciona un segundo medio independiente de apagar el reactor. El sistema de apagado de reserva se compone de nueve varillas que se insertan en los canales del lado reflector para apagar el reactor.

El Xe-100 a parte de la generación eléctrica proporciona otros beneficios entre los que encontramos:

- El reactor Xe-100, parecido a los dos anteriores, está diseñado para una construcción modular rápida, siendo prefabricado, transportado e instalado in situ.
- El Xe-100 tiene flexibilidad de uso, siendo posible su aplicación para procesamiento químico en producción de desalinización del agua, procesamiento petroquímico, producción de hidrógeno y calefacción urbana. Puede realizar alguno de estos procesos simultáneamente al procesamiento químico o cambiar entre aplicaciones.

En la Figura 23 X-Energy muestra la estructura del Xe-100 y su combustible:

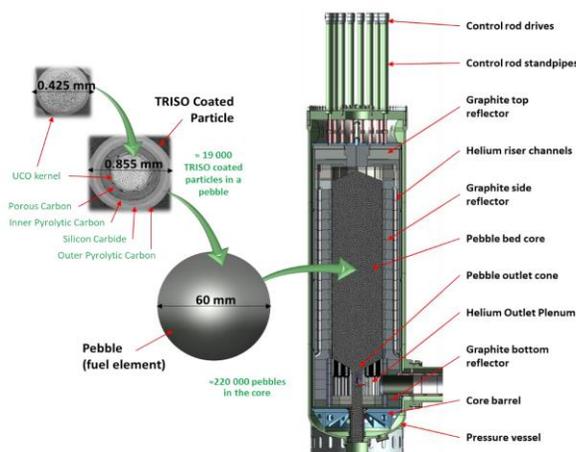


Figura 23 - SMR de X-Energy

Fuente: Basic Core Design Parameters (X—Energy’s Xe-100 Reactor Design Status, 2021)

Actualmente el XE-100 sigue en etapas de desarrollo y diseño. Así mismo X-Energy está en búsqueda de colaboradores para poder realizar la construcción de un posible prototipo de prueba.

A continuación, en la Tabla 9 se muestran las características del Xe-100 con información proporcionada por X-Energy:

| Tabla 9 - Características del Xe-100 | | |
|--|---|------------------------|
| Característica | Descripción | Unidad |
| Costo Nivelado de Energía (LCOE) | El LCOE contempla para esta planta los costos de capital, operación y desmantelamiento. | 60[\$/MWh] |
| Potencia Eléctrica | La planta "Xe-100" puede agrupar 4 módulos con una potencia de 80MWe cada uno. | 320[MWe] |
| Potencia Térmica | La planta "Xe-100" puede agrupar 4 módulos con una potencia de 200MWt cada uno. | 800[MWt] |
| Tiempo de vida operacional | Tiempo de operación desde su encendido a su apagado. | 50[Años] |
| Ciclo de reabastecimiento de combustible | El Xe-100 utiliza su propio combustible llamado "Triso-x" que son guijarros que contienen partículas de material radioactivo y se van cubriendo bajo capas de carbono. La vida útil de cada guijarro es aproximadamente de 1320 días. | 3[Años] |
| Desalinización del agua | Dentro de la flexibilidad de operación del Xe-100, puede ayudar en la producción de desalinización del agua, procesado petroquímico, producción de hidrógeno y calefacción urbana. | - |
| Procesado químico | | - |
| Impacto de Descarbonización | Emisiones de gases de efecto invernadero (CO ₂). | 0 |
| Uso de suelo | El Xe-100 tiene un uso de suelo de 400 yardas. | 0.33[km ²] |
| Empleados para construcción | Considerando el "Xe-100", el personal requerido para su construcción. | - |
| Empleados para operación | Considerando el "Xe-100", el personal requerido para su operación. | - |
| Madurez tecnológica | Etapa de la tecnología entre su planteamiento conceptual hasta su puesta en operación. | Diseño |
| Tiempo de construcción | Se contempla un tiempo de construcción menor a 5 años. | 5[Años] |

Fuente: Elaboración propia con datos proporcionados X-Energy's Xe-100 Reactor Design Status (X-Energy, 2021)

4) GE-Hitachi – BWRX-300

El "BWRX-300" es una planta nuclear de tipo "BWR" con tecnología de 10° generación desarrollada por la compañía estadounidense General Electric Hitachi. El BWRX-300 es una planta con un único reactor que tiene una potencia eléctrica de 300MWe y una potencia térmica de 870MWt.

GE Hitachi propone en su diseño las siguientes características tecnológicas:

- Cuenta con un sistema de seguridad pasiva que aprovecha la base de diseño y licencia del "ESBWR" certificado por la Comisión de Regulación Nuclear (NRC) de EEUU en el

año 2014, como el reactor LWR más seguro del mundo. Su sistema de condensación de vapor y gravedad permiten que el BWRX-300 se enfríe solo durante un mínimo de siete días sin energía ni acción del operador.

- Dentro de la industria, GE Hitachi propone que el BWRX-300 es un SMR inteligente con un diseño sencillo que permite una operación sencilla y a bajo riesgo.
- Su costo nivelado de energía aproximado es de 44\$/MWh a 51\$/MWh según cálculos realizados por Pacific Northwest National Laboratory en el año 2019.
- A través de mezclas de técnicas de construcciones modulares y abiertas, el BWRX-300 se puede construir en un lapso de 24-36 meses reduciendo el volumen aproximado del 90% del diseño de la planta con respecto a plantas nucleares convencionales.
- Tiene la capacidad de proporcionar vapor para procesos con calor térmico, como desalinización del agua, calefacción urbana o producción de hidrógeno.
- Su emisión de gases de efecto invernadero y CO₂ es casi nula, por lo que GE Hitachi espera que esta tecnología apoye a una transición a energías limpias.

En la Figura 24 se muestra la estructura de la planta:

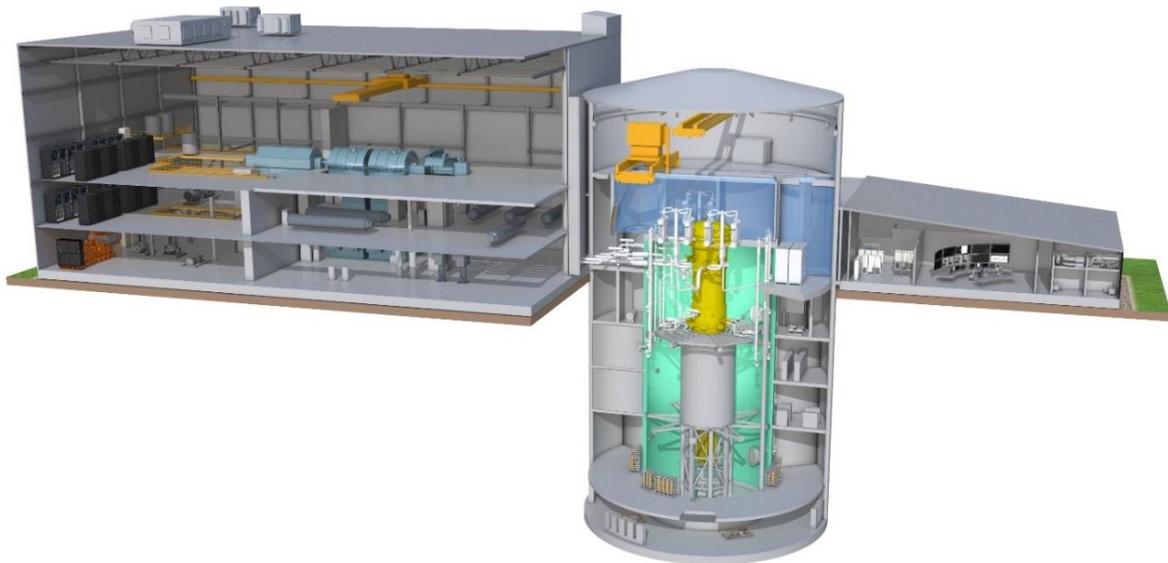


Figura 24 - SMR de GE-Hitachi

Fuente: The BWRX-300 Small Modular Reactor (GE-Hitachi BWRX-300, 2021)

Actualmente GE Hitachi ha sido seleccionado por Ontario Power Generation como socio tecnológico para el nuevo proyecto nuclear en el que se planea implementar el BWRX-300 en el sitio de Darlington, Canadá. Se espera que el proyecto esté terminado en el año 2028. Además de Canadá, el interés por esta tecnología se ha visto en Polonia, Estonia y República Checa, realizando colaboraciones de investigación para determinar si este módulo puede ser beneficioso para sus implementaciones.

En la Tabla 10 se presentan las características más importantes del BWRX-300 con datos obtenidos por GE-Hitachi y algunos estudios realizados por el Pacific Northwest National Laboratory:

| Tabla 10 - Características del BWRX-300 | | |
|--|---|---|
| Característica | Descripción | Unidad |
| Costo Nivelado de Energía (LCOE) | El LCOE contempla para esta planta los costos de capital, operación y desmantelamiento. | 44-51[\$/MWh] |
| Potencia Eléctrica | La planta “BWRX-300” cuenta con una potencia de 300MWe. | 300[MWe] |
| Potencia Térmica | La planta “BWRX-300” cuenta con una potencia de 870MWt. | 870[MWt] |
| Tiempo de vida operacional | Tiempo de operación desde su encendido a su apagado. | 60[Años] |
| Ciclo de reabastecimiento de combustible | El ciclo de reabastecimiento de combustible es de 10-20 días cada 24 meses con combustible enriquecido a menos del 5%. | 2[Años] |
| Desalinización del agua | Tiene la capacidad de proporcionar vapor para procesos con calor térmico, como desalinización del agua, calefacción urbana o producción de hidrógeno. | - |
| Procesado químico | Emisiones de gases de efecto invernadero (CO ₂). | - |
| Impacto de Descarbonización | | 0[g/kWh] |
| Uso de suelo | El BWRX-300 tiene un uso de suelo de 26,300 m ² . | 0.0263[km ²] |
| Empleados para construcción | Considerando el “BWRX-300”, el personal requerido para su construcción. | 1700 [Empleados] |
| Empleados para operación | Considerando el “BWRX-300”, el personal requerido para su operación. | 197 [Empleados] |
| Madurez tecnológica | Etapa de la tecnología entre su planteamiento conceptual hasta su puesta en operación. | Pre-licencia / Proyecto de implementación |
| Tiempo de construcción | Se contempla un tiempo de construcción menor a 5 años. | 2-3[Años] |

Fuente: Elaboración propia con datos proporcionados por GE Hitachi del BWRX-300 (GE Hitachi, 2022)

F. SMRs como alternativa en procesado químico

Los SMR aparte de su principal aplicación en producción de energía eléctrica, poseen la flexibilidad para ser destinados como apoyo para procesos químico-industriales que requieren una alta demanda térmica. De los procesos a los que puede ayudar a su producción se encuentran principalmente la desalinización del agua, producción de hidrógeno, procesados petroquímicos y producción de químicos gas natural y sintético, entre otros.

Las aplicaciones que en esta investigación más importan son la desalinización del agua para proveer a la comunidad con agua potable dada la localización de BCS y su acceso al agua, y la producción de hidrógeno y gas natural/sintético los cuales actualmente son una fuente de combustible ecológico que puede presentar a futuro un gran cambio en las problemáticas de cambio climático y efecto invernadero.

1) SMRs en la producción de hidrógeno y gas natural/sintético

Dentro de los procesados químicos que los SMR pueden ayudar a producir, encontramos principalmente la generación de hidrógeno y gas natural/sintético. Aquí tenemos dos ejemplos:

- Aplicación de un HTGR para la producción de hidrógeno: En este caso, se realizó una investigación por parte de la Facultad de Ingeniería, UNAM, tomando como objeto de estudio el reactor HTTR-30 creado por JAEA (Japan Atomic Energy Agency) para su entera aplicación para la producción de hidrógeno. Este reactor fue seleccionado debido a que es un reactor experimental actualmente funcional y con datos reales. El modelo creado para la planta de producción de hidrógeno se muestra en la Figura 25.

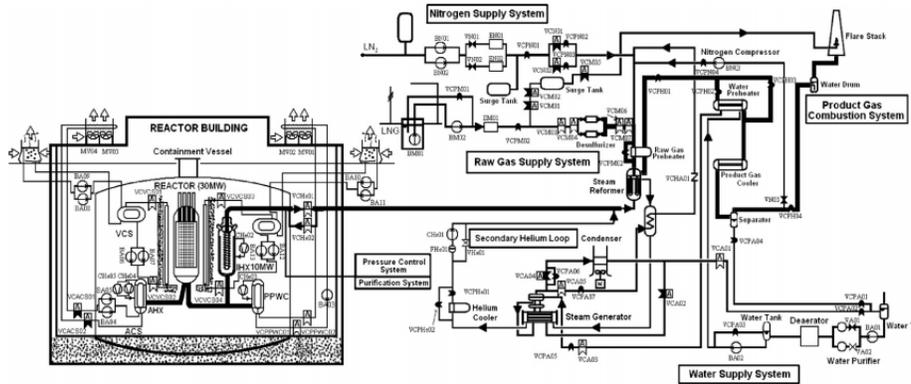


Fig. 2. Coupling of HTTR and methane reforming plant.

Figura 25 - Emparejamiento de un HTTR-30 con una planta reformadora de metano

Fuente: A design_phase PSA of a Nuclear-powered hydrogen plant (Elsevier, 2006)

- Combinación de un HTGR con módulo de gasificación de biomasa: Este es un método en el cual el SMR de tipo HTGR proporciona la potencia térmica suficiente como apoyo a un módulo de gasificación de biomasa donde un horno de lecho fluidizado doble tiene el objetivo de producir la separación de los químicos contenidos en la biomasa, produciendo de esta forma al menos hidrógeno y gas natural sintético. Esta investigación tomó como punto de inicio la planta GoBiGas en Gothenbur, Suecia, y realizó la implementación del HTGR dentro de su estructura (ver Figura 26).

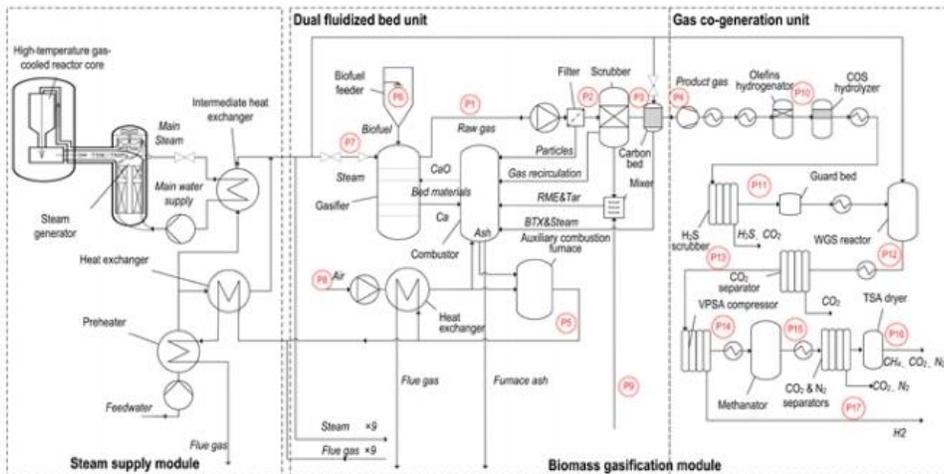


Figura 26 - Planta HTR-BiGas

Fuente: Combining Dual Fluidized Bed and High Temperature Gas-Cooled Reactor for co-producing hydrogen and synthetic natural gas by Biomass Gasification (X-Energy, 2021)

2) SMRs en la desalinización del agua

En cuanto a la desalinización del agua que los SMR pueden ayudar a producir, aquí tenemos algunos ejemplos:

- En Canadá, cuentan con la planta desalinizadora CANDU-CANDESAL, la cual es una planta que utiliza reactores PHWR con un sistema de desalinización por osmosis inversa (ver Figura 27). El sistema térmico se compone por el CANDU 6 (700MWe), que es un reactor de agua pesada para moderar y refrigerar el reactor, cuenta con sistemas de apagado pasivo y reacción rápida, sistema de regulación del reactor y sistemas control y balance digital automatizado. En cuanto al sistema de desalinización, el CANDESAL RO presenta un sistema de alimentación de agua precalentada que resulta eficiente en la producción de agua dulce y reducciones de costo. Este proceso de Osmosis Inversa (RO) es un proceso de separación donde el agua (en este caso de mar) se “forza” fuera de la solución salina concentrada al fluir a través de una membrana a una alta presión estática.

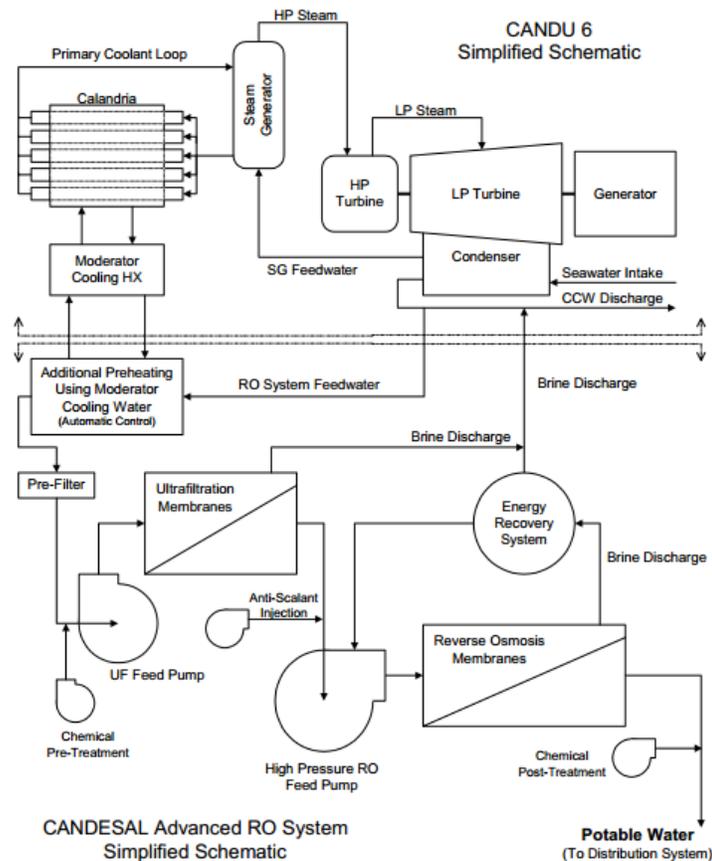


Figura 27 - Esquema simplificado del sistema de desalinización nuclear CANDU-6 CANDESAL

Fuente: Status of design concepts of nuclear desalination plants (IAEA, 2002)

- En la Universidad Técnica de Denmark, se propuso aplicar una planta desalinizadora con una planta de generación híbrida. En la Figura 28 se presenta la combinación de generación por energía eólica, nuclear y solar, para aplicar tanto un proceso de desalinización por osmosis inversa como por Flash Multi-etapa (MSF). En la desalinización

por MSF técnicamente se destila el agua para eliminar la salinidad del agua marina y volverla potable.

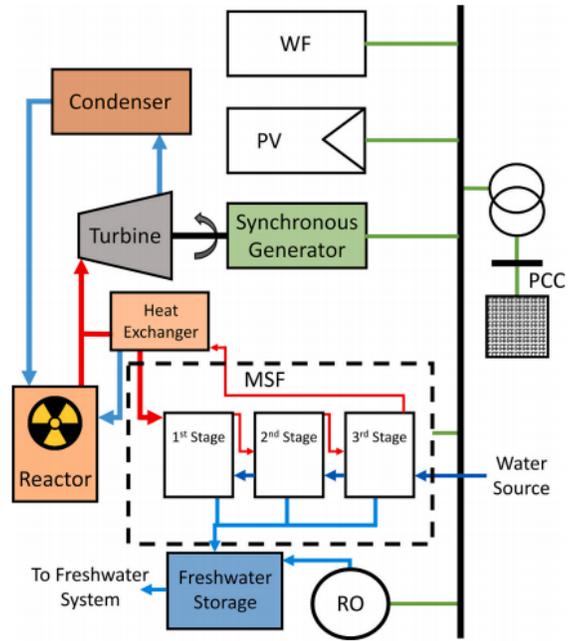


Figura 28 - Esquema propuesto para la HyPP desalinizadora de la UTD

Fuente: Machine learning-driven Energy management of a hybrid nuclear-wind-solar-desalination plant (ELSEVIER, 2022)

IV. METODOLOGÍA KIND

La metodología KIND (Indicadores clave para sistemas innovadores de energía nuclear) es una herramienta de evaluación mediante la teoría del valor de múltiples atributos. Proporciona una solución para la evaluación comparativa de escenarios de implementación de los SMRs, las NES basados en SMRs y NES/escenarios de SMRs en relación con otros sistemas de energía nuclear o no nuclear, tomando como referencia el estado, las perspectivas, los beneficios y los riesgos asociados con el desarrollo de tecnologías nucleares y despliegue de sistemas de energía nuclear.

La evaluación se basa en un conjunto limitado de indicadores clave (no más de 15-20) definidos en áreas de la metodología INPRO para NES tales como dimensión económica, dimensión ambiental, dimensión social, dimensión institucional u otras a considerar.

A. Dimensiones e indicadores

Debido a que el presente trabajo realiza una comparativa entre diferentes plantas nucleoelectricas de tipo SMR y no se realizan comparativas con otro tipo de tecnologías de producción de energía eléctrica, las dimensiones, así como sus indicadores serán:

- Dimensión económica
 - Costo Nivelado de Energía (LCOE): Corresponde a las estimaciones de ingresos necesarios para construir y operar una planta de generación eléctrica a partir de su ciclo de vida útil. Mide el coste total que la instalación tendrá a lo largo de su vida y lo divide por su producción de energía. Este contempla los gastos de inversión anual, los costes de operación y mantenimiento y los costes de combustible. La medida estándar para su evaluación es en [\$/MWh], siendo el costo evaluado en dólares US.
 - Tiempo de construcción: Representa el tiempo estimado de construcción de la instalación. Debido a que los costos son variables en el tiempo, el aproximado permite tener en cuenta el tiempo de inversión hasta la puesta en operación de la planta. Este tiempo se expresa en [años].
- Dimensión de desempeño operativo
 - Potencia eléctrica: Refiere a la cantidad de energía eléctrica producida expresada en [MWe].
 - Eficiencia: Refiere a la cantidad de energía producida dada la cantidad de potencia térmica generada y se expresada en [MWe/MWt].
 - Tiempo de vida: Refiere a la cantidad de tiempo de vida útil, que para este caso se expresa en [años].
 - Ciclo de reabastecimiento de combustible: Refiere a los ciclos de tiempo de vida útil del combustible, expresado en [años].
- Dimensión ambiental
 - Impacto de descarbonización: Aunque el nombre representa una reducción en la descarbonización, expresa realmente la cantidad de emisiones de carbono en unidades [g/kWh].

- Uso de suelo: Es la extensión territorial necesaria para la construcción y alrededores de la planta eléctrica según la energía producida expresada en [m²/MWe].
- Dimensión social
 - Empleos durante la construcción: Cantidad de supuestos empleos generados por los fabricantes durante la etapa de construcción.
 - Empleos en la operación: Cantidad de supuestos empleos generados en la operación de la planta.
- Dimensión de madurez tecnológica
 - Estatus tecnológico: Este es un punto arbitrario ya que depende del estatus de la planta a nivel global. Esto refiere a si se encuentra en etapas de diseño conceptual/teórico, si ya ha concluido con el diseño y se encuentra en revisiones técnicas para obtener licencias y permisos de uso, si se encuentra en proceso de contratos de implementación, si está en construcción o inclusive si se encuentra en operación.
 - Flexibilidad: Este apartado recibe una puntuación arbitraria y refiere a la cantidad de aplicaciones o alternativas que proporcionan los sistemas.

Una vez definidas las dimensiones y sus indicadores, estructuramos el árbol de objetivos el cual será la guía para el análisis principal (ver Figura 29).

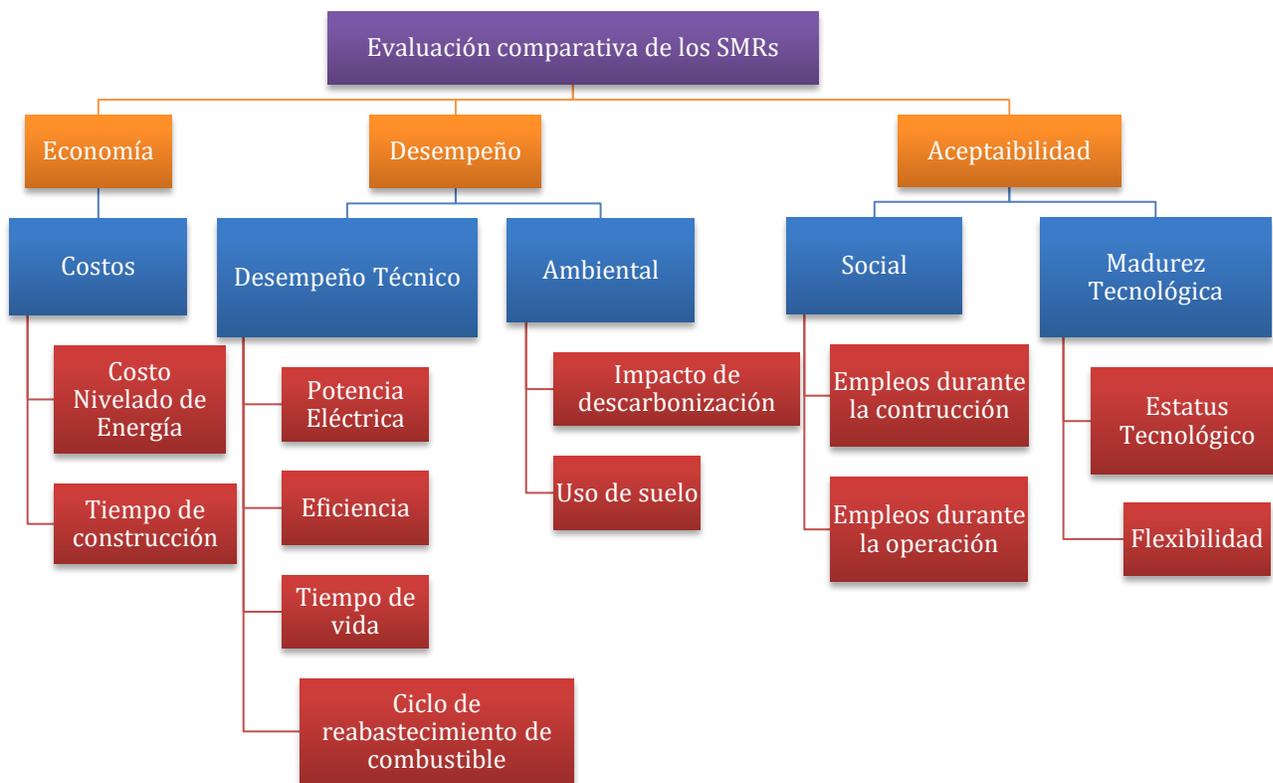


Figura 29 - Árbol de Objetivos

B. Aplicación de la metodología

1) Factores de ponderación

Los factores de ponderación son los niveles de peso que poseen los diferentes niveles de acuerdo con su nivel de importancia. Está guiada por la “función de valor multi-atributo”:

$$u(x) = \sum_{i=1}^n k_i u_i(x_i) + k \sum_{\substack{j>i \\ j>i \\ l>j}}^n k_i k_j u_i(x_i) u_j(x_j) + k^2 \sum_{\substack{j>i \\ j>i \\ l>j}}^n k_i k_j k_l u_i(x_i) u_j(x_j) u_l(x_l) \\ + k^{n-1} k_1 k_2 \dots k_n u_1(x_1) u_2(x_2) \dots u_n(x_n), \text{ donde } 1 + k = \prod_{i=1}^n (1 + k k_i) \quad (1)$$

Donde $u_i(x_i)$ representa la función de valor de atributo único para el indicador i con escala de 0 a 1 y k_i es el peso para los indicadores.

Otra función de valor multi-atributo aplicada en diferentes estudios es la de “modelo aditivo de función de valor multi-atributos”:

$$u(x) = \sum_{i=1}^n k_i u_i(x_i), \text{ donde } \sum_{i=1}^n k_i = 1 \quad (2)$$

Los supuestos de independencia que justifican el uso del modelo aditivo son razonables para este análisis debido a las relaciones entre los objetivos y medidas, y los resultados son más fáciles de interpretar cuando se utiliza el modelo aditivo.

Dado que el árbol de objetivos de la metodología KIND propuesto es de tres niveles, el procedimiento para realizar la ponderación jerárquica parte del nivel de mayor importancia hasta el de menor para así obtener los pesos finales de los indicadores.

La restricción para los pesos de los objetivos de alto nivel es:

$$\sum_{i=1}^{N_h} w_h^i = 1 \quad (3)$$

Donde N_h es el número de objetivos de alto nivel y w_h^i es el peso para el objetivo de alto nivel i .

La restricción para los pesos de áreas de evaluación es:

$$\sum_{j=1}^{N^i} w_a^{i,j} = 1 \quad (4)$$

Donde N^i es el número de áreas contenidas en el objetivo de alto nivel i y $w_a^{i,j}$ es el peso para el área de evaluación j del objetivo de alto nivel i .

La restricción para los pesos de los indicadores es:

$$\sum_{k=1}^{N^{i,j}} w_{ind}^{i,j,k} = 1 \quad (5)$$

Donde $N^{i,j}$ es el número de indicadores contenidos en el área de evaluación j del objetivo de alto nivel i y $w_{ind}^{i,j,k}$ es el peso del indicador k del área de evaluación j dentro de los objetivos de alto nivel “ i ”. Los factores de ponderación finales se determinan como la multiplicación de los anteriores pesos mostrados de la siguiente forma:

$$W^k = w_h^i * w_a^{i,j} * w_{ind}^{i,j,k} \quad (6)$$

Tomando como base el árbol de objetivos, se diseñó la Tabla 11 de factores de ponderación otorgando mayor peso al desempeño de las plantas y dejando los pesos equitativos para los indicadores de economía y aceptabilidad.

| Tabla 11 - Factores de ponderación | | | | | | |
|------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------|--------------------|-----------------------|--------------------------|---------------|
| Objetivos de Alto Nivel | Pesos de los Objetivos de Alto Nivel | Áreas | Pesos de las Áreas | Abreviatura | Pesos de los indicadores | Pesos finales |
| <i>Economía</i> | 0.3 | <i>Costos</i> | 1 | <i>C-1 [\$/MWh]</i> | 0.7 | 0.210 |
| <i>Economía</i> | 0.3 | <i>Costos</i> | 1 | <i>C-2 [Years]</i> | 0.3 | 0.090 |
| <i>Desempeño</i> | 0.4 | <i>Desempeño Técnico</i> | 0.7 | <i>DT-1 [MWe]</i> | 0.25 | 0.070 |
| <i>Desempeño</i> | 0.4 | <i>Desempeño Técnico</i> | 0.7 | <i>DT-2 [MWe/MWt]</i> | 0.25 | 0.070 |
| <i>Desempeño</i> | 0.4 | <i>Desempeño Técnico</i> | 0.7 | <i>DT-3 [Years]</i> | 0.25 | 0.070 |
| <i>Desempeño</i> | 0.4 | <i>Desempeño Técnico</i> | 0.7 | <i>DT-4 [Months]</i> | 0.25 | 0.070 |
| <i>Desempeño</i> | 0.4 | <i>Ambiental</i> | 0.3 | <i>A-1 [g/kWh]</i> | 0.5 | 0.060 |
| <i>Desempeño</i> | 0.4 | <i>Ambiental</i> | 0.3 | <i>A-2 [M2/MWe]</i> | 0.5 | 0.060 |
| <i>Aceptabilidad</i> | 0.3 | <i>Social</i> | 0.3 | <i>S-1 [Jobs]</i> | 0.5 | 0.045 |
| <i>Aceptabilidad</i> | 0.3 | <i>Social</i> | 0.3 | <i>S-2 [Jobs]</i> | 0.5 | 0.045 |
| <i>Aceptabilidad</i> | 0.3 | <i>Madurez Tecnológica</i> | 0.7 | <i>MT-1</i> | 0.6 | 0.126 |
| <i>Aceptabilidad</i> | 0.3 | <i>Madurez Tecnológica</i> | 0.7 | <i>MT-2</i> | 0.4 | 0.084 |

2) Tabla de desempeño

La tabla de desempeño es aquella en donde se les dota de una calificación a los sistemas de estudio partiendo de los indicadores obtenidos en el árbol de objetivos. Los parámetros de puntuación dependerán de la unidad del indicador y los valores que los sistemas que se esté evaluando y en el caso de los que son no poseen una unidad de medida se aplica la “Escala de Likert” la cual, si bien se utiliza como instrumento para medir opiniones y actitudes, aquí servirá para establecer una escala multi-elemento para respuestas cerradas con una puntuación mínima de 1 y una máxima de 5. La escala de Likert muestra su fundamento de uso en Figura 30:



Figura 30 - Escala de Likert

Fuente: 5 ejemplos de escalas Likert para tu próxima encuesta (QuestionPro)

Las consideraciones especiales y justificaciones para los indicadores donde se aplica la escala Likert son:

- MT-1: Debido a que este indicador depende del nivel de avance entre el diseño y su operación las calificaciones corresponden a:
 1. Diseño conceptual básico.
 2. Avanzada etapa de diseño.
 3. Conclusión de la etapa de diseño y en procesos de diseños de prueba.
 4. Proceso de revisiones técnicas para certificaciones de uso comercial.
 5. Cuenta con certificaciones de uso comercial, está en construcción o incluso ya está en operación.
- MT-2: Este indicador refiere a las posibles aplicaciones de las plantas y sus módulos SMR. Como ejemplo podemos decir que todos tienen la posibilidad de aplicarse a la desalinización del agua o ciertos procesados químicos, pero considerando la cantidad de módulos a agrupar NuScale puede colocar plantas de 4, 6 u 8 módulos, mientras que Terrestrial Energy solo propone plantas con un único módulo, también se puede considerar que los ciclos de recarga de combustible se pueden alternar evitando apagar la planta entera y reducir la potencia en grandes cantidades, entre otras cosas.

La Tabla 12 de desempeño resultante es la siguiente:

| Tabla 12 – Desempeños | | | | | | | | | |
|-------------------------|-------------------|--|-----------------------|-----------|-----------|--------------------|-----------------------------------|-------------------|-----------------------|
| Objetivos de Alto Nivel | Áreas | Indicadores | Abreviatura | MIN score | MAX score | NuScale "VOYGR-12" | Terrestrial Energy "Integral MSR" | X-Energy "Xe-100" | GE Hitachi "BWRX-300" |
| Economía | Costos | Costo Nivelado de Energía | <i>C-1 [\$ /MWh]</i> | 47.5 | 60 | 52.5 | 50 | 60 | 47.5 |
| Economía | Costos | Tiempo de construcción | <i>C-2 [Years]</i> | 3 | 5 | 3 | 4 | 5 | 3 |
| Desempeño | Desempeño Técnico | Potencia Eléctrica | <i>DT-1 [MWe]</i> | 195 | 924 | 924 | 195 | 320 | 300 |
| Desempeño | Desempeño Técnico | Eficiencia | <i>DT-2 [MWe/MWt]</i> | 0.3448 | 0.4432 | 0.385 | 0.4432 | 0.4 | 0.3448 |
| Desempeño | Desempeño Técnico | Tiempo de vida | <i>DT-3 [Years]</i> | 50 | 60 | 60 | 50 | 50 | 60 |
| Desempeño | Desempeño Técnico | Ciclo de reabastecimiento de combustible | <i>DT-4 [Months]</i> | 24 | 84 | 24 | 84 | 36 | 24 |
| Desempeño | Ambiental | Impacto de descarbonización | <i>A-1 [g/kWh]</i> | 0 | 15 | 15 | 10 | - | 0 |
| Desempeño | Ambiental | Uso de suelo | <i>A-2 [M2/MWe]</i> | 86.66 | 1031.25 | 389.61 | 358.97 | 1031.25 | 86.66 |
| Aceptabilidad | Social | Empleos durante la construcción | <i>S-1 [Jobs]</i> | 1600 | 2100 | 1600 | 2100 | - | 1700 |
| Aceptabilidad | Social | Empleos en la operación | <i>S-2 [Jobs]</i> | 200 | 580 | 270 | 580 | - | 200 |

| Objetivos de Alto Nivel | Áreas | Indicadores | Abreviatura | MIN score | MAX score | NuScale "VOYGR-12" | Terrestrial Energy "Integral MSR" | X-Energy "Xe-100" | GE Hitachi "BWRX-300" |
|-------------------------|---------------------|---------------------|-------------|-----------|-----------|--------------------|-----------------------------------|-------------------|-----------------------|
| Aceptabilidad | Madurez Tecnológica | Estatus tecnológico | MT-1 | 1 | 5 | 5 | 2 | 1 | 5 |
| Aceptabilidad | Madurez Tecnológica | Flexibilidad | MT-2 | 1 | 5 | 5 | 4 | 5 | 2 |

3) Tabla de funciones de valor de atributo único

La tabla de valores de atributo único es aquella donde a los datos de la tabla de desempeño se les otorga un valor equivalente al peso del indicador. En estas tablas se desarrolla una normalización con la ayuda de las siguientes ecuaciones dadas por la Metodología KIND:

$$\text{Función de valor creciente lineal} \rightarrow V(x) = \frac{x-x^{\min}}{x^{\max}-x^{\min}} \quad (7)$$

$$\text{Función de valor decreciente lineal} \rightarrow V(x) = \frac{x^{\max}-x}{x^{\max}-x^{\min}} \quad (8)$$

Donde x^{\max} es la mayor puntuación posible, x^{\min} es la menor puntuación posible y x es la puntuación obtenida.

También se pueden obtener resultados en función exponencial, las cual se definen por:

$$\text{Función de valor creciente Exponencial} \rightarrow V(x) = \frac{1-e^{\left(a \cdot \frac{x-x^{\min}}{x^{\max}-x^{\min}}\right)}}{1-e^a} \quad (9)$$

$$\text{Función de valor decreciente lineal} \rightarrow V(x) = \frac{1-e^{\left(a \cdot \frac{x^{\max}-x}{x^{\max}-x^{\min}}\right)}}{1-e^a} \quad (10)$$

Donde las variables son las mismas a las anteriores y a es la potencia exponencial denominada "nivel de propensión al riesgo".

La aplicación de valor creciente o decreciente depende de si se busca que se tenga un valor menor (como el coste) o mayor (como la eficiencia). Los resultados de la normalización se muestran en la Tabla 13.

| Objetivos de Alto Nivel | Áreas | Indicadores | Abreviatura | Meta | MIN VF dominio | MAX VF dominio | NuScale "VOYGR-12" | Terrestrial Energy "Integral MSR" | X-Energy "Xe-100" | GE Hitachi "BWRX-300" |
|-------------------------|--------|---------------------------|--------------|------|----------------|----------------|--------------------|-----------------------------------|-------------------|-----------------------|
| Economía | Costos | Costo Nivelado de Energía | C-1 [\$/MWh] | min | 47.5 | 60 | 0.600 | 0.800 | 0.000 | 1.000 |

Tabla 13 - Funciones de valor de atributo único (Forma lineal)

| Objetivos de Alto Nivel | Áreas | Indicadores | Abreviatura | Meta | MIN VF dominio | MAX VF dominio | NuScale "VOYGR-12" | Terrestrial Energy "Integral MSR" | X-Energy "Xe-100" | GE Hitachi "BWRX-300" |
|-------------------------|---------------------|--|----------------|------|----------------|----------------|--------------------|-----------------------------------|-------------------|-----------------------|
| Economía | Costos | Tiempo de construcción | C-2 [Years] | min | 3 | 5 | 1.000 | 0.500 | 0.000 | 1.000 |
| Desempeño | Desempeño Técnico | Potencia Eléctrica | DT-1 [MWe] | max | 195 | 924 | 1.000 | 0.000 | 0.171 | 0.144 |
| Desempeño | Desempeño Técnico | Eficiencia | DT-2 [MWe/MWt] | max | 0.3448 | 0.4432 | 0.409 | 1.000 | 0.561 | 0.000 |
| Desempeño | Desempeño Técnico | Tiempo de vida | DT-3 [Years] | max | 50 | 60 | 1.000 | 0.000 | 0.000 | 1.000 |
| Desempeño | Desempeño Técnico | Ciclo de reabastecimiento de combustible | DT-4 [Months] | max | 24 | 84 | 0.000 | 1.000 | 0.200 | 0.000 |
| Desempeño | Ambiental | Impacto de descarbonización | A-1 [g/kWh] | min | 0 | 15 | 0.000 | 0.333 | - | 1.000 |
| Desempeño | Ambiental | Uso de suelo | A-2 [M2/MWe] | min | 86.66 | 1031.2 | 0.679 | 0.712 | 0.000 | 1.000 |
| Aceptabilidad | Social | Empleos durante la construcción | S-1 [Jobs] | max | 1600 | 2100 | 0.000 | 1.000 | - | 0.200 |
| Aceptabilidad | Social | Empleos en la operación | S-2 [Jobs] | max | 200 | 580 | 0.184 | 1.000 | - | 0.000 |
| Aceptabilidad | Madurez Tecnológica | Estatus tecnológico | MT-1 | max | 1 | 5 | 1.000 | 0.250 | 0.000 | 1.000 |
| Aceptabilidad | Madurez Tecnológica | Flexibilidad | MT-2 | max | 1 | 5 | 1.000 | 0.750 | 1.000 | 0.250 |

En la Figura 31 se muestra el comportamiento de cada SMR en los diferentes indicadores sometidos a evaluación.

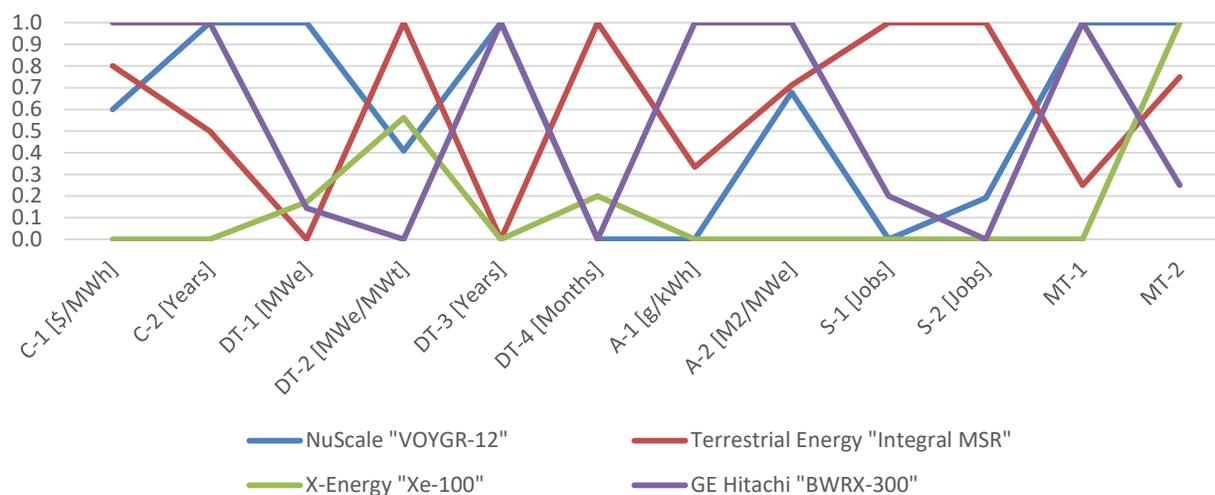


Figura 31 - Gráfico de los valores de atributo único

4) Clasificación de resultados

La clasificación de resultados es la lista principal para interpretar los resultados del cálculo y formular recomendaciones con base en éstos. En caso de no obtener resultados satisfactorios el autor puede volver atrás en los pasos.

Los resultados de la clasificación se muestran de forma gráfica sobre información de las puntuaciones de los objetivos de alto nivel de las funciones de valor multi-atributos y sus componentes desplegados en como la suma total de las puntuaciones obtenidas por los sistemas de estudio en sus indicadores. Estos gráficos ilustran claramente el alto nivel y el área de rendimiento asociado con cada NES. Cabe mencionar que para obtener los resultados se utiliza el “modelo aditivo de función de valor multi-atributo” presentado anteriormente.

Para el análisis previamente realizado los resultados obtenidos fueron los siguientes (Ver Tabla 14):

| Tabla 14 - Clasificación de Resultados | | | | |
|--|--------------------|-----------------------------------|-------------------|-----------------------|
| Niveles | NuScale "VOYGR-12" | Terrestrial Energy "Integral MSR" | X-Energy "Xe-100" | GE Hitachi "BWRX-300" |
| <i>Valor Multi-Atributo</i> | 0.644 | 0.600 | 0.149 | 0.656 |
| Objetivos de Alto Nivel | | | | |
| <i>Economía</i> | 0.216 | 0.213 | 0.000 | 0.300 |
| <i>Desempeño</i> | 0.209 | 0.203 | 0.065 | 0.200 |
| <i>Aceptabilidad</i> | 0.218 | 0.185 | 0.084 | 0.156 |
| Áreas | | | | |
| <i>Costos</i> | 0.216 | 0.213 | 0.000 | 0.300 |
| <i>Desempeño Técnico</i> | 0.169 | 0.140 | 0.065 | 0.080 |
| <i>Ambiental</i> | 0.041 | 0.063 | 0.000 | 0.120 |
| <i>Social</i> | 0.008 | 0.090 | 0.000 | 0.009 |
| <i>Madurez Tecnológica</i> | 0.210 | 0.095 | 0.084 | 0.147 |

De la Tabla 14, podemos expresar los resultados de forma gráfica en sus diferentes niveles de profundidad resultando los siguientes resultados gráficos (ver Figura 32-34):

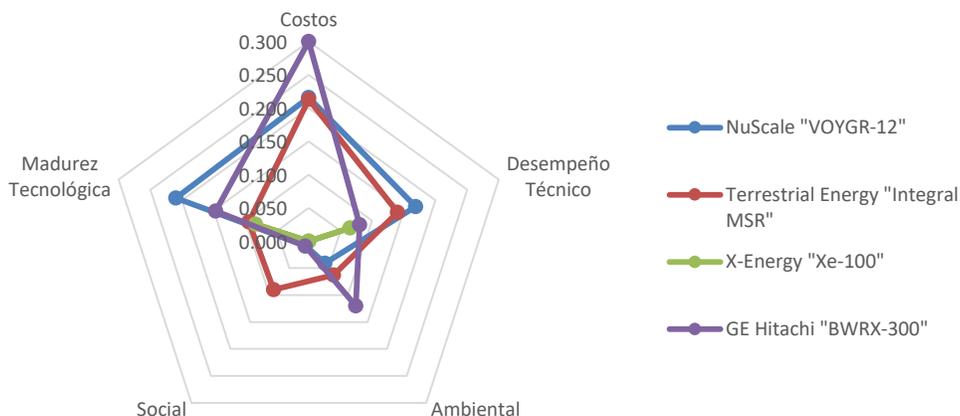


Figura 32 - Gráfico de los Puntajes de Área

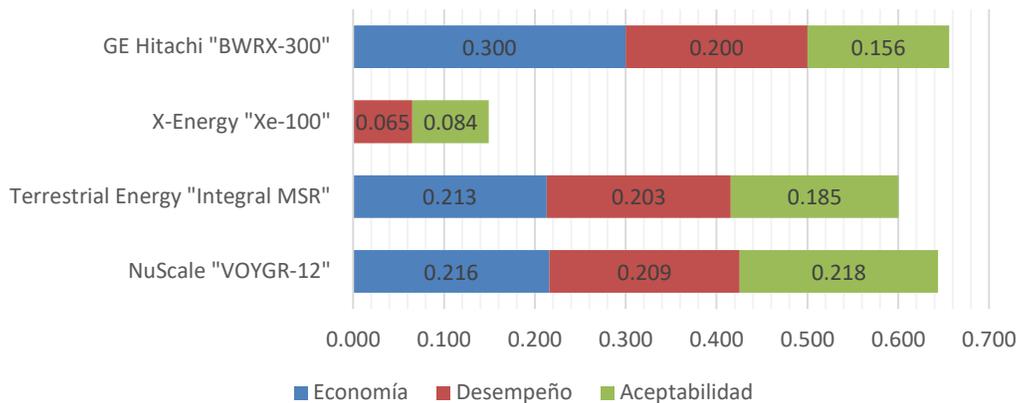


Figura 33 - Gráfico de los Objetivos de Alto Nivel

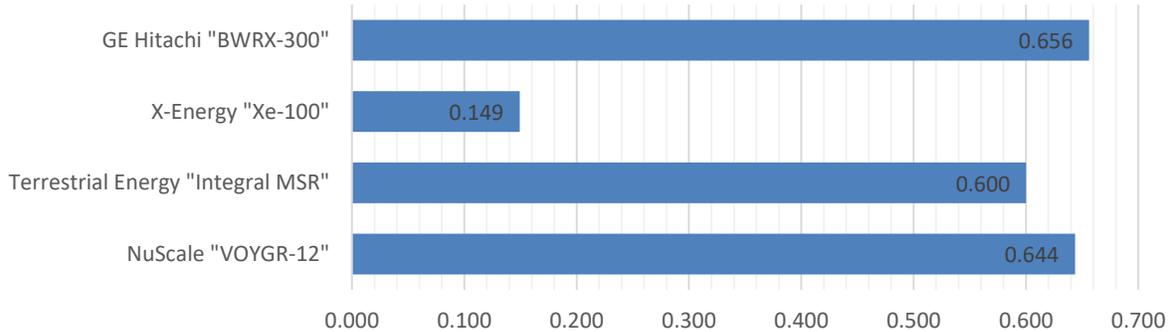


Figura 34 - Gráfico de los Valores Multi-Atributo

5) Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad se realiza en los factores de ponderación y en las funciones de valor de atributo único. Estos análisis se realizan para mostrar qué tan certeros son los resultados en relación con la variación de los pesos, en el caso de los factores de ponderación, y la variación lineal respecto a un análisis exponencial en las funciones de valor de atributo único.

En el análisis de sensibilidad para los factores de ponderación, se modifican los pesos (ver Tabla 15) y se realiza una comparación entre el caso base y el nuevo caso el cual se llamará modificado los cuales se muestran en la Tabla 16 y la Figura 35.

Tabla 15 - Factores de ponderación (Caso modificado)

| Objetivos de Alto Nivel | Pesos de los Objetivos de Alto Nivel | Áreas | Pesos de las Áreas | Abreviatura | Pesos de los indicadores | Pesos finales |
|-------------------------|--------------------------------------|--------------------------|--------------------|---------------------|--------------------------|---------------|
| <i>Economía</i> | 0.3 | <i>Costos</i> | 1 | <i>C-1 [\$/MWh]</i> | 0.7 | 0.210 |
| <i>Economía</i> | 0.3 | <i>Costos</i> | 1 | <i>C-2 [Years]</i> | 0.3 | 0.090 |
| <i>Desempeño</i> | 0.5 | <i>Desempeño Técnico</i> | 0.7 | <i>DT-1 [MWe]</i> | 0.25 | 0.088 |

Tabla 15 - Factores de ponderación (Caso modificado)

| Objetivos de Alto Nivel | Pesos de los Objetivos de Alto Nivel | Áreas | Pesos de las Áreas | Abreviatura | Pesos de los indicadores | Pesos finales |
|-------------------------|--------------------------------------|---------------------|--------------------|----------------|--------------------------|---------------|
| Desempeño | 0.5 | Desempeño Técnico | 0.7 | DT-2 [MWe/MWt] | 0.25 | 0.088 |
| Desempeño | 0.5 | Desempeño Técnico | 0.7 | DT-3 [Years] | 0.25 | 0.088 |
| Desempeño | 0.5 | Desempeño Técnico | 0.7 | DT-4 [Months] | 0.25 | 0.088 |
| Desempeño | 0.5 | Ambiental | 0.3 | A-1 [g/kWh] | 0.5 | 0.075 |
| Desempeño | 0.5 | Ambiental | 0.3 | A-2 [M2/MWe] | 0.5 | 0.075 |
| Aceptabilidad | 0.2 | Social | 0.3 | S-1 [Jobs] | 0.5 | 0.030 |
| Aceptabilidad | 0.2 | Social | 0.3 | S-2 [Jobs] | 0.5 | 0.030 |
| Aceptabilidad | 0.2 | Madurez Tecnológica | 0.7 | MT-1 | 0.6 | 0.084 |
| Aceptabilidad | 0.2 | Madurez Tecnológica | 0.7 | MT-2 | 0.4 | 0.056 |

Tabla 16 - Análisis de sensibilidad de los factores de ponderación

| | NuScale "VOYGR-12" | Terrestrial Energy "Integral MSR" | X-Energy "Xe-100" | GE Hitachi "BWRX-300" |
|-----------------|--------------------|-----------------------------------|-------------------|-----------------------|
| Caso base | 0.644 | 0.600 | 0.149 | 0.656 |
| Caso modificado | 0.623 | 0.589 | 0.138 | 0.654 |
| % de error | 3.173 | 1.803 | 7.826 | 0.302 |

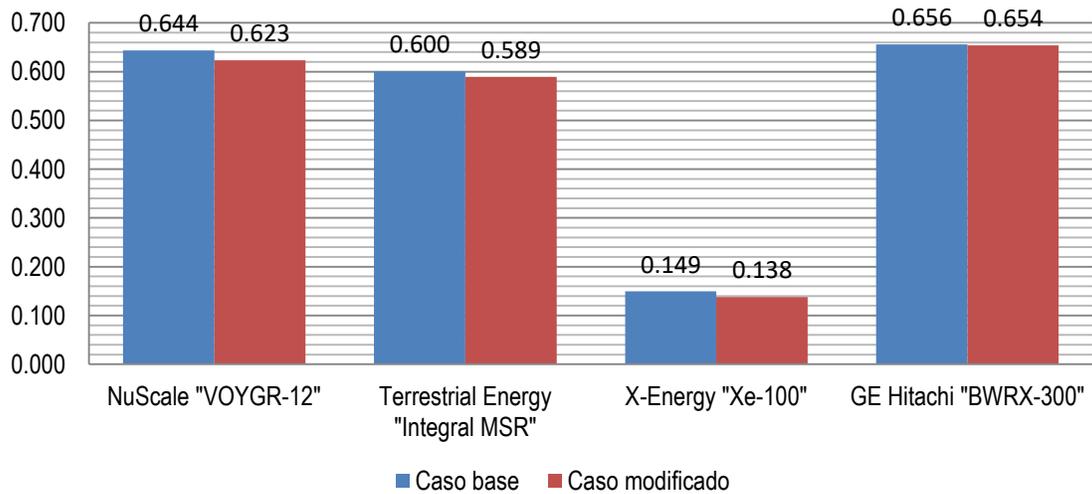


Figura 35 - Análisis de sensibilidad de los factores de ponderación

En el caso del análisis a la sensibilidad a las funciones de valores de atributo único, este análisis realiza una comparativa entre los resultados de la tabla de desempeño que se realizan de forma lineal (ver Tabla 13) contra una tabla de desempeño realizada en forma exponencial (ver Tabla 17) y se realiza una comparación entre el caso lineal y el caso exponencial mostrada en la Tabla 18 y la Figura36.

| Tabla 17 - Funciones de valor de atributo único (Caso Exponencial) | | | | | | | |
|---|-------------|--------------|-----------------------|---------------------------|--|--------------------------|------------------------------|
| Abreviatura | Meta | Forma | Exponent power | NuScale "VOYGR-12" | Terrestrial Energy "Integral MSR" | X-Energy "Xe-100" | GE Hitachi "BWRX-300" |
| <i>C-1 [\$/MWh]</i> | min | exp | 1.000 | 0.478 | 0.713 | 0.000 | 1.000 |
| <i>C-2 [Years]</i> | min | exp | 1.000 | 1.000 | 0.378 | 0.000 | 1.000 |
| <i>DT-1 [MWe]</i> | max | exp | 1.000 | 1.000 | 0.000 | 0.109 | 0.090 |
| <i>DT-2 [MWe/MWt]</i> | max | exp | 1.000 | 0.294 | 1.000 | 0.438 | 0.000 |
| <i>DT-3 [Years]</i> | max | exp | 1.000 | 1.000 | 0.000 | 0.000 | 1.000 |
| <i>DT-4 [Months]</i> | max | exp | 1.000 | 0.000 | 1.000 | 0.129 | 0.000 |
| <i>A-1 [g/kWh]</i> | min | exp | 1.000 | 0.000 | 0.230 | 0.000 | 1.000 |
| <i>A-2 [M2/MWe]</i> | min | exp | 1.000 | 0.566 | 0.604 | 0.000 | 1.000 |
| <i>S-1 [Jobs]</i> | max | exp | 1.000 | 0.000 | 1.000 | 0.000 | 0.129 |
| <i>S-2 [Jobs]</i> | max | exp | 1.000 | 0.118 | 1.000 | 0.000 | 0.000 |
| <i>MT-1</i> | max | exp | 1.000 | 1.000 | 0.165 | 0.000 | 1.000 |
| <i>MT-2</i> | max | exp | 1.000 | 1.000 | 0.650 | 1.000 | 0.165 |

| Tabla 18 - Análisis de sensibilidad de funciones de valor de atributo único | | | | |
|--|---------------------------|--|--------------------------|------------------------------|
| | NuScale "VOYGR-12" | Terrestrial Energy "Integral MSR" | X-Energy "Xe-100" | GE Hitachi "BWRX-300" |
| Caso base | 0.644 | 0.600 | 0.149 | 0.656 |
| Caso modificado | 0.600 | 0.539 | 0.131 | 0.642 |
| % de error | 6.736 | 10.158 | 12.046 | 2.147 |

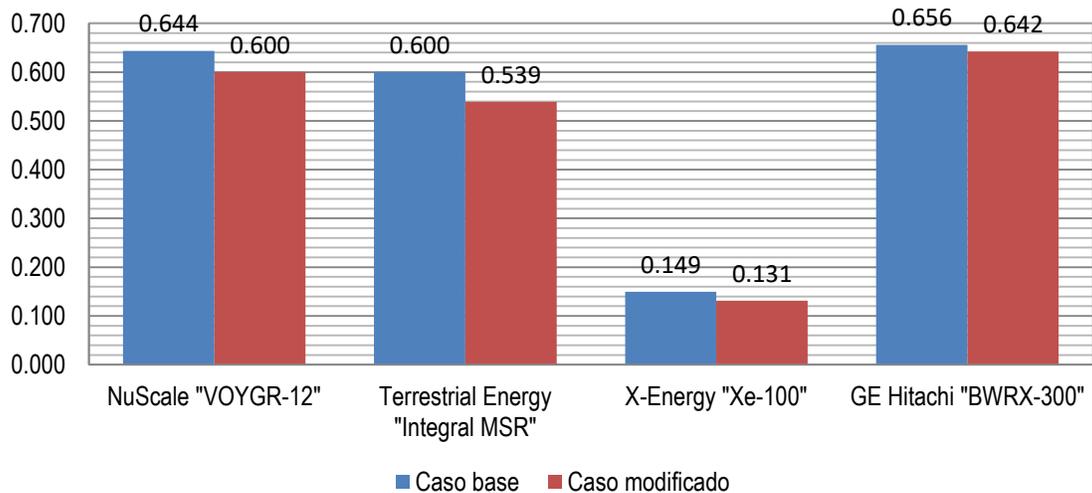


Figura 36 - Análisis de sensibilidad de funciones de valor de atributo único

C. Interpretación de resultado

De los resultados previos, se interpreta que, de los cuatro sistemas analizados, los tres que presentan resultados adecuados para su selección son el "VOYGR-12" de NuScale, el "Integral MSR" de Terrestrial Energy y el "BWRX-300" de GE Hitachi, dejando fuera de escena al "Xe-100" de X-Energy. Cabe destacar que, aunque el "Integral MSR" presenta un buen resultado, debido a que su madurez tecnológica sigue siendo baja solo se recomendará a tomar en consideración para futuros estudios.

De los dos sistemas restantes el "BWRX-300" muestra un ligero mejor rendimiento con respecto al "VOYGR-12", aunque realmente ambos poseen resultados completamente favorables para ser considerados como opciones viables de plantas a implementar.

El "BWRX-300" de GE Hitachi, aunque presenta una planta con un único módulo, tiene una gran potencia eléctrica y un buen desempeño técnico en general, es aceptable en los parámetros de aceptabilidad y su mayor ventaja se presenta en el carácter económico estando su LCOE en el promedio. Su desventaja principal es la flexibilidad que proporciona, pero ambientalmente es el que presenta mayor ventaja.

Respecto al "VOYGR-12" de NuScale, aunque en este trabajo se consideró la planta de 12 módulos, el fabricante también ofrece opciones de 4 y 6 módulos, aparte de poder disponer los módulos para desalinización del agua o procesados químicos de manera independiente, lo que lo vuelve la opción más flexible de todas. Así mismo presenta el mejor desempeño técnico en relación con su costo, además de ser una de las tecnologías más maduras en la industria nuclear.

De estas dos opciones, si se espera utilizar la planta solamente para producción eléctrica la mejor opción es el "BWRX-300", pero debido a todas las posibilidades de flexibilidad tanto en aplicación como en incremento de módulos lo que parece ser mejor opción es la planta "VOYGR" donde se podrían seleccionar la cantidad de módulos y la aplicación individual según las necesidades que se tengan.

V. CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos en este trabajo, para el estado de Baja California Sur, el gobierno de México y la Comisión Federal de Electricidad, la mejor opción de planta nuclear a implementar es la “VOYGR” de NuScale por su flexibilidad para seleccionar entre 4, 6 o 12 módulos, lo cual puede ayudar a planificar el crecimiento de la capacidad instalada del estado para cumplir con la demanda energética actual y la proyectada, comenzar una transición a energías limpias con mayor impacto y reducir la producción de gases de efecto invernadero y de CO₂. Además de las mejoras técnicas que pueden ofrecer las plantas “VOYGR”, los módulos pueden apoyar la mejora del bienestar social con su capacidad de desalinización de agua o su industria local mediante el apoyo a la síntesis química.

Como se mencionó anteriormente, otra central nuclear a considerar es la “BWRX-300” de GE Hitachi, que, aunque está limitada a 300MWe, puede proveer una mejora importante para el estado de BCS debido a que también tiene un buen desempeño y considerando que la “Central Nuclear Laguna Verde” tiene dos GE “BWR-5”, el país está mayormente familiarizado con sus reglamentos, normas y su tecnología, lo que tal vez facilitaría su implementación. El que el país esté familiarizado con esta compañía y las regulaciones de su país de origen puede permitir ahorros en capacitación y evitar tener que integrar nuevas regulaciones lo que agilizaría la implementación de la planta a su operación. Así mismo presenta el mejor costo y el desempeño ambiental al no emitir gases de efecto invernadero o CO₂ y teniendo poco uso de suelo.

Dado que la mayoría de apagones causados por déficit energético se producen principalmente en el municipio de La Paz (o al menos son de los que se tienen registros en este trabajo), así como que en este existe la mayor contaminación por gases de efecto invernadero y CO₂ de las cuales las centrales CCI y Punta Prieta son fuentes emisoras, y en conjunto a su concentración poblacional, podría ser conveniente la colocación de una planta nuclear en este estado en un plan de transición a energías limpias. La elección de este lugar puede ayudar a cubrir la demanda y déficit energética existente, reducir la contaminación del aire junto con las enfermedades respiratorias que genera y apoyar térmicamente a la planta desalinizadora que se espera esté funcionando a finales de año.

Una problemática que probablemente se tenga que sobrellevar y superar es la actual percepción que se le tiene a la energía nuclear dentro de la nación, pues durante varios años la “Central Nuclear Laguna Verde” ha sido objeto de opiniones polarizadas tanto positivas como negativas, que aunado a que algunas naciones (como Alemania) alrededor del mundo han comenzado a apagar sus centrales nucleares, se genera un precedente que dificulta la aceptación pública necesaria para poder implementar una planta sin complicaciones por parte de la población.

La Metodología KIND propuesta por el OIEA ha resultado ser una excelente herramienta para la selección y comparación de los sistemas de estudio SMR, por lo que para futuros proyectos/trabajos de análisis de este tipo de sistemas se recomendaría su implementación.

Referencias

Azamar Alonso A., García Beltrán Y. M., (2021), Energía nuclear, ¿qué está en juego: beneficio económico o bienestar socioambiental?, Espiral (Estudios sobre estado y sociedad) Vol. XXVIII No. 82.

CENACE. (25 de Enero del 2021). PAMRNT 2021-2035.

CERCAa. (27 de Mayo del 2021). Propuesta de energía para BCS.

CERCAb. (2021). Diagnóstico de Energía y Calidad del Aire en La Paz 2021.

CERCAc. (2020). Respuesta de CFE a la petición de transferencia con referencia UT/SAIP/1264/20 con folio 1816400095920.

CESOP. (2011) Cápsula semanal de opinión pública no.173, “Generación de energía” y “Funcionamiento de las plantas nucleares”

CONACYT. (2021). Energía y cambio climático. <https://conacyt.mx/pronaces/pronaces-energia-y-cambio-climatico/> (Consulta: 24/02/2022)

Foro de la Industria Nuclear Española. (2020) Energía Nuclear en el Mundo <https://www.foronuclear.org/descubre-la-energia-nuclear/energia-nuclear-en-el-mundo/> (Consulta: 13/06/2022)

Gabriel Piaz A., (2020), Controversia por la producción de nucleoelectricidad en México, PAAKAT: Revista de tecnología y sociedad, PAAKAT: rev. tecnol. soc. vol.10 no.18 Guadalajara mar. 2020 Epub 28-Ago-2020

GBCS. (2021). Plan Estatal de Desarrollo de Baja California Sur, 2021-2027.

GEHitachia. (2022). BWRX-300. <https://nuclear.gepower.com/build-a-plant/products/nuclear-power-plants-overview/bwrx-300> (Consulta: 01/08/2022)

GEHitachib. (2022). ESBWR Nuclear Power Plant. <https://nuclear.gepower.com/build-a-plant/products/nuclear-power-plants-overview/esbwr> (Consulta: 01/08/2022)

GEHitachic. (2022). Small Modular Nuclear Reactors: The Future of Carbon-Free Energy (Infography)

GEHitachid. (2021). BWRX-300 Small Modular Reactor, Innovation drives Simplification. (Infography)

GEHitachie. (2021). BWRX-300, One of the most economical SMR designs available

IMCO. (7 de Octubre del 2021). Reforma Eléctrica, Transición Energética y COP26. <https://imco.org.mx/reforma-electrica-transicion-energetica-y-cop26/> (Consulta: 24/02/2022)

Weimar R. Mark, Zbib Ali, Todd Don, Buongiorno Jacopo, Shirvan Koroush. (April 2008). Techno-economic Assessment for Generation III+ Small Modular Reactor Deployments in the Pacific Northwest. Pacific Northwest National Laboratory. U.S. Department of Energy.

Murakami T., Anbumozhi V. (2018), An International Analysis of Public Acceptance of Nuclear Power. Eria Research Project Report 2017 No. 03

Nelson P. F., Flores A. Francois J. L., (2007) A design-phase PSA of a nuclear-powered hydrogen plant. Elsevier. Nuclear Engineering and Design 237 (2007) 219-229.

NuScalea. (2021). The Benefits of NuScale's Tehcnology. <https://www.nuscalepower.com/benefits> (Consulta: 20/12/21)

NuScaleb. (2021). NuScale's SMR Tehcnology. <https://www.nuscalepower.com/technology> (Consulta: 20/12/21)

NuScalec. (2021). Why Small Modular Reactors? <https://www.nuscalepower.com/environment> (Consulta: 20/12/21)

NuScaled. (2021). NuScale SMR Technology: An ideal solution for repurposing U.S. coal plant infrastructure and revitalizing communities. <https://www.nuscalepower.com/environment> (Consulta: 20/12/21)

NuScalee. (2022). The Carbon Free Power Project <https://www.nuscalepower.com/Projects/Carbon-Free-Power-Project> (Consulta: 20/06/22)

OIEAa. (2019). Application of Multi-criteria Decision Analysis Methods to Comparative Evaluation of Nuclear Energy System Options: Final Report of the INPRO Collaborative Project Kind.

OIEAb. (2020). Advances in Small Modular Reactor Technology Developements

OIEAc. (3 de Noviembre del 2021). ¿Qué es la energía nuclear?, La ciencia de la energía nucleoelectrica. <https://www.iaea.org/es/newscenter/news/que-es-la-energia-nuclear-la-ciencia-de-la-energia-nucleoelectrica> (Consulta: 28/12/2021)

OIEAd. (3 de Diciembre del 2021). ¿Qué son los reactores modulares pequeños (SMR)? <https://www.iaea.org/es/newscenter/news/que-son-los-reactores-modulares-pequenos-smr> (Consulta: 28/12/2021)

OIEAe. (2002). Status of design concepts of nuclear desalination plants.

OIEAf. (2007). Status of nuclear desalination in IAEA member states.

OIEAg. (2017). User instructions for KIND-ET (KIND-Evaluation Tool)

Palacios Hernandez J. C., (09/09/2019), “Los retos de las Energías Limías en el mediano y largo plazo: Energía Nuclear”, Academia de Ingeniería de México.

Proyectos México. (2021). 0893 Planta Desalinizadora en La Paz, Baja California Sur. https://www.proyectosmexico.gob.mx/proyecto_inversion/0893-planta-desalinizadora-en-la-paz-baja-california-sur/ (Consulta: 15/03/2021)

Ritchie H., Roser M. (2020) Electricity Mix. Our World In Data. <https://ourworldindata.org/electricity-mix> (Consulta: 14/06/2022)

Ritchie H., Roser M. (2020) Nuclear Energy. Our World In Data. <https://ourworldindata.org/nuclear-energy> (Consulta: 14/06/2022)

SESMARTAN, SETUES, GBCS. (2018). PROAIRE 2018-2027.

SESMARTAN, (30 de Diciembre del 2020). Diario Oficial, Plan Nacional Hídrico 2020-2024.

SENERa. (30 de Junio del 2021). PRODESEN 2021-2035. Ciudad de México.

SENERb. (1 de Junio del 2018). PRODESEN 2018-2032. Ciudad de México.

SENER. (17/07/2020). Renueva SENER licencia de operación a Unidad 1 de la Central Nuclear Laguna Verde. <https://www.gob.mx/sener/articulos/renueva-sener-licencia-de-operacion-a-unidad-1-de-la-central-nuclear-laguna-verde?idiom=es> (Consulta: 15/06/2021)

SETUES, GBCS. (2021). Baja California Sur, Información estratégica 2021.

Terrestrial Energya. (2021). IMSR Technology. <https://www.terrestrialenergy.com/technology/> (Consulta: 24/12/2021)

Terrestrial Energyb. (Octubre 2021). Leadint the way to bring a bright Energy future: Terrestrial Energy’s IMSR400 Economic Benefit Assessment. <https://www.terrestrialenergy.com/technology/> (Consulta: 24/12/2021)

Terrestrial Encyc. (Junio 2022) US and Canadian Regulators Complete Joint Technical Review Of IMSR <https://www.terrestrialenergy.com/2022/06/07/us-and-canadian-regulators-complete-joint-technical-review-of-imsr/> (Consulta: 22/06/2022)

Vázquez Pombo D., W. Bindner H., V. Spataru S., E. Sorensen P., Rygaard M., (2022), Machine learning-driven energy management of a hybrid nuclear-wind-solar-desalination plant, Elsevier.

VGDE., SECTUR., (2020) Central Nuclear Laguna Verde <https://veracruz.mx/attractivo.php?idnota=1416> (Consulta: 15/06/2021)

Wang J., Kim S., (2018) Comparative Analysis of Public Attitude Toward Nuclear Power Energy Across 27 European Countries by Applying the Multilevel Model. MDPI (Multidisciplinary Digital Publishing Institute).

X-Energya. (2021). X-Energy Reactor: Xe-100. <https://x-energy.com/technology> (Consulta: 23/12/2021)

X-Energyb. (26 de Mayo del 2021). X-Energy's Xe-100 Reactor Design Status <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiAj7S-uNb6AhXDMEQIHafNCWgQFnoECAwQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.nationalacademies.org%2Fevent%2F05-26-2021%2Fdocs%2FDCE0F339E2C8CFC45FAA4307321C76F94D303E3075EF&usg=AOvVaw2XpJu26f6-CBNYR3VM0cNb> (Consulta: 23/12/2021)

Zhou, Y.; Gu, Z.; Dong, Y.; Xu, F.; Zhang, Z. (2021) Combining Dual Fluidized Bed and High-Temperature Gas-Cooled Reactor for Co-Producing Hydrogen and Synthetic Natural Gas by Biomass Gasification. *Energies* 2021, 14, 5683. <https://doi.org/10.3390/en14185683>