

MAESTRÍA INTERDISCIPLINARIA EN ENERGÍA
UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES



TESIS DE MAESTRÍA:

“Energía nuclear en el mundo: estado del arte y proyecciones futuras”

- TESISISTA: Facundo Fraguas
- DIRECTOR DE TESIS: Norberto Coppari
- CODIRECTORA DE TESIS: Norma Boero

Buenos Aires, 2019

ÍNDICE GENERAL

| | |
|---|----|
| ÍNDICE GENERAL..... | 2 |
| ÍNDICE DE TABLAS | 5 |
| ÍNDICE DE GRÁFICOS | 6 |
| ÍNDICE DE FIGURAS | 9 |
| 1. INTRODUCCIÓN AL TEMA DE TESIS | 11 |
| 2. ENERGÍA NUCLEAR..... | 12 |
| 2.1. Antecedentes..... | 12 |
| 2.2. Accidentes y su repercusión en el desarrollo nuclear | 13 |
| 2.2.1. Accidente de Three Mile Island | 13 |
| 2.2.2. Accidente de Chernobyl..... | 17 |
| 2.2.3. Accidente de Fukushima..... | 19 |
| 2.3. Centrales nucleares: estado del arte a febrero de 2019 | 25 |
| 2.3.1. Centrales Nucleares en operación..... | 25 |
| 2.3.2. Centrales Nucleares en construcción | 32 |
| 2.3.3. Centrales Nucleares retiradas de servicio | 34 |
| 2.3.4. Resumen | 37 |
| 3. ENERGÍA NUCLEAR EN EL MUNDO | 38 |
| 3.1. América..... | 40 |
| 3.1.1. Argentina | 40 |
| 3.1.2. Brasil | 42 |
| 3.1.3. México..... | 44 |
| 3.1.4. Estados Unidos..... | 46 |
| 3.1.5. Canadá | 50 |
| 3.2. Europa..... | 53 |
| 3.2.1. Bélgica..... | 53 |
| 3.2.2. Bulgaria | 55 |
| 3.2.3. República checa | 57 |
| 3.2.4. Finlandia..... | 59 |
| 3.2.5. Francia..... | 61 |
| 3.2.6. Alemania | 64 |
| 3.2.7. Hungría..... | 66 |
| 3.2.8. Italia | 68 |
| 3.2.9. Lituania..... | 70 |
| 3.2.10. Holanda..... | 71 |

| | |
|---|-----|
| 3.2.11. Rumania | 73 |
| 3.2.12. Eslovaquia | 75 |
| 3.2.13. Eslovenia | 77 |
| 3.2.14. España..... | 79 |
| 3.2.15. Suecia | 81 |
| 3.2.16. Suiza | 83 |
| 3.2.17. Ucrania..... | 85 |
| 3.2.18. Reino Unido | 87 |
| 3.3. Asia..... | 90 |
| 3.3.1. Armenia..... | 90 |
| 3.3.2. China | 92 |
| 3.3.3. India | 94 |
| 3.3.4. Irán..... | 98 |
| 3.3.5. Japón | 100 |
| 3.3.6. Kazajistán..... | 103 |
| 3.3.7. Pakistán | 105 |
| 3.3.8. Rusia | 107 |
| 3.3.9. República de Corea..... | 111 |
| 3.4. África | 113 |
| 3.4.1. Sudáfrica..... | 113 |
| 3.5. Países emergentes..... | 114 |
| 3.5.1. Bielorrusia..... | 115 |
| 3.5.2. Bangladesh | 116 |
| 3.5.3. Turquía | 118 |
| 3.5.4. Emiratos Árabes Unidos | 120 |
| 3.5.5. Egipto..... | 122 |
| 3.5.6. Jordania | 123 |
| 4. RESUMEN: ESTADO ACTUAL Y TENDENCIA RESPECTO DE LA ENERGÍA NUCLEAR..... | 125 |
| 4.1. América | 126 |
| 4.2. Europa | 127 |
| 4.3. Asia | 129 |
| 4.4. África | 131 |
| 4.5. Proyección de energía nuclear mundial..... | 132 |
| 4.6. Comparación de resultados obtenidos en la Tesis con los proyectados por OIEA e IEA ... | 132 |
| 4.6.1. Proyección de potencia instalada nuclear por OIEA | 132 |
| 4.6.2. Proyección de potencia instalada nuclear por IEA..... | 135 |
| 4.6.3. Comparación de resultados obtenidos | 135 |
| 5. FUNCIONAMIENTO GENERAL DE UNA CENTRAL NUCLEAR | 137 |

| | | |
|--------|---|-----|
| 5.1. | Introducción | 137 |
| 5.2. | Circuito primario..... | 139 |
| 5.3. | Circuito secundario..... | 142 |
| 5.4. | Tipos de centrales nucleares | 143 |
| 5.4.1. | Descripción conceptual de cada tecnología | 144 |
| 5.4.2. | Resumen de tipos de reactores..... | 152 |
| 6. | ENERGÍA NUCLEAR DEL FUTURO: ESCENARIOS Y TECNOLOGÍAS | 153 |
| 6.1. | Proyectos GAINS y SYNERGIES | 153 |
| 6.2. | Reactores modulares pequeños..... | 154 |
| 6.3. | Reactores nucleares de IV Generación..... | 156 |
| 6.4. | Posible integración futura de energía nuclear con energías renovables | 159 |
| 6.5. | Reactores de fusión nuclear – PROYECTO ITER..... | 160 |
| 7. | CONCLUSIONES | 162 |
| | ABREVIATURAS Y NOMENCLATURA..... | 175 |
| | BIBLIOGRAFÍA..... | 177 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|-----|
| Tabla N°1: Estado de las unidades de Fukushima previo al accidente | 20 |
| Tabla N°2: Reactores planificados por Reino Unido | 88 |
| Tabla N°3: Reactores planificados por la India | 95 |
| Tabla N°4: Proyectos propuestos de nuevas centrales nucleares en la India | 96 |
| Tabla N°5: Proyectos planeados por Irán para iniciar su construcción | 99 |
| Tabla N°6: Centrales nucleares retiradas de servicio luego de Fukushima [PRIS-IAEA] | 101 |
| Tabla N°7: Producción anual de uranio de Kazajistán..... | 104 |
| Tabla N°8: Centrales nucleares planificadas por el gobierno ruso | 109 |
| Tabla N°9: Centrales nucleares en construcción en Bielorrusia | 115 |
| Tabla N°10: Centrales nucleares en construcción en Bangladesh | 117 |
| Tabla N°11: Planificación de centrales nucleares en Turquía | 118 |
| Tabla N°12: Centrales nucleares en construcción en Emiratos Árabes Unidos | 121 |
| Tabla N°13: Centrales nucleares planificadas por el Gobierno Egipcio | 122 |
| Tabla N°14: Referencias de esquemas representativos que definen la tendencia..... | 125 |
| Tabla N°15: Resumen de proyección de potencia instalada nuclear del continente americano ... | 126 |
| Tabla N°16: Resumen de proyección de potencia instalada nuclear del continente europeo | 128 |
| Tabla N°17: Proyección de potencia instalada nuclear en el continente asiático | 130 |
| Tabla N°18: Proyección de potencia instalada nuclear en el continente africano | 131 |
| Tabla N°19: Tabla comparativa de tipos de reactores [Elaboración propia] | 152 |

ÍNDICE DE GRÁFICOS

| | |
|--|----|
| Gráfico N° 1: Evolución de energía suministrada con generación nuclear en el mundo | 24 |
| Gráfico N° 2: Reactores Nucleares en operación por país a febrero de 2019 [PRIS-IAEA]..... | 26 |
| Gráfico N° 3: Reactores Nucleares en operación por región a febrero de 2019 [PRIS-IAEA]..... | 27 |
| Gráfico N° 4: Evolución de la cantidad de reactores en operación en el mundo [PRIS-IAEA]..... | 27 |
| Gráfico N° 5: Evolución de la capacidad instalada nuclear mundial [PRIS-IAEA] | 28 |
| Gráfico N° 6: Participación nuclear y reactores nucleares por país [7] | 30 |
| Gráfico N° 7: Cantidad de reactores operativos según antigüedad [PRIS-IAEA] | 31 |
| Gráfico N° 8: Potencia promedio de reactores según su antigüedad [PRIS-IAEA] | 32 |
| Gráfico N° 9: Reactores nucleares en construcción por país a enero de 2019 [PRIS-IAEA] | 33 |
| Gráfico N° 10: Cantidad de construcciones de centrales nucleares iniciadas por año [PRIS-IAEA] . | 34 |
| Gráfico N° 11: Cantidad de centrales nucleares retiradas de servicio por país [PRIS-IAEA] | 34 |
| Gráfico N° 12: Cantidad de centrales nucleares retiradas de servicio por año [PRIS-IAEA]..... | 35 |
| Gráfico N° 13: Potencia nuclear retirada de servicio por año [PRIS-IAEA] | 35 |
| Gráfico N° 14: Potencia acumulada según cantidad de centrales retirada de servicio [PRIS-IAEA]. | 36 |
| Gráfico N° 15: Salidas de servicio según motivos estipulados por país [Elaboración propia] | 37 |
| Gráfico N° 16: Centrales nucleares por país con su correspondiente estado [PRIS-IAEA] | 38 |
| Gráfico N° 17: Proyección de potencia instalada nuclear en Argentina..... | 41 |
| Gráfico N° 18: Proyección de potencia instalada nuclear en Brasil..... | 44 |
| Gráfico N° 19: Proyección de potencia instalada nuclear en México..... | 46 |
| Gráfico N° 20: Proyección de potencia instalada nuclear en Estados Unidos..... | 49 |
| Gráfico N° 21: Proyección de potencia instalada nuclear en Canadá | 52 |
| Gráfico N° 22: Proyección de potencia instalada nuclear en Bélgica | 55 |
| Gráfico N° 23: Proyección de potencia instalada nuclear en Bulgaria | 57 |
| Gráfico N° 24: Proyección de potencia instalada nuclear en República Checa | 59 |
| Gráfico N° 25: Proyección de potencia instalada nuclear en Finlandia | 61 |
| Gráfico N° 26: Proyección de potencia instalada nuclear en Francia..... | 63 |
| Gráfico N° 27: Proyección de potencia instalada nuclear en Alemania | 66 |
| Gráfico N° 28: Proyección de potencia instalada nuclear en Hungría | 68 |
| Gráfico N° 29: Proyección de potencia instalada nuclear en Holanda | 72 |
| Gráfico N° 30: Proyección de potencia instalada nuclear en Rumania | 74 |
| Gráfico N° 31: Proyección de potencia instalada nuclear en Eslovaquia | 76 |
| Gráfico N° 32: Proyección de potencia instalada nuclear en Eslovenia | 78 |

| | |
|--|-----|
| Gráfico N° 33: Proyección de potencia instalada nuclear en España | 80 |
| Gráfico N° 34: Proyección de potencia instalada nuclear en Suecia | 82 |
| Gráfico N° 35: Proyección de potencia instalada nuclear en Suiza | 84 |
| Gráfico N° 36: Proyección de potencia instalada nuclear en Ucrania | 86 |
| Gráfico N° 37: Proyección de potencia instalada nuclear en Reino Unido..... | 89 |
| Gráfico N° 38: Proyección de potencia instalada nuclear en Armenia..... | 91 |
| Gráfico N° 39: Proyección de potencia instalada nuclear en China | 93 |
| Gráfico N° 40: Proyección de potencia instalada nuclear en India | 97 |
| Gráfico N° 41: Proyección de potencia instalada nuclear en Irán..... | 100 |
| Gráfico N° 42: Evolución de la participación nuclear en Japón [PRIS-IAEA] | 101 |
| Gráfico N° 43: Proyección de potencia instalada nuclear en Japón..... | 103 |
| Gráfico N° 44: Proyección de potencia instalada nuclear en Kazajistán | 105 |
| Gráfico N° 45: Proyección de potencia instalada nuclear en Pakistán | 107 |
| Gráfico N° 46: Proyección de potencia instalada nuclear en Rusia | 110 |
| Gráfico N° 47: Proyección de potencia instalada nuclear en República de Corea..... | 112 |
| Gráfico N° 48: Proyección de potencia instalada nuclear en Sudáfrica | 114 |
| Gráfico N° 49: Proyección de potencia instalada nuclear en Bielorrusia..... | 116 |
| Gráfico N° 50: Proyección de potencia instalada nuclear en Bangladesh | 117 |
| Gráfico N° 51: Proyección de potencia instalada nuclear en Turquía..... | 120 |
| Gráfico N° 52: Proyección de potencia instalada nuclear en Emiratos Árabes Unidos | 121 |
| Gráfico N° 53: Proyección de potencia instalada nuclear en Egipto..... | 123 |
| Gráfico N° 54: Proyección de potencia instalada nuclear en Jordania | 124 |
| Gráfico N° 55: Proyección de potencia instalada nuclear en América..... | 126 |
| Gráfico N° 56: Proyección de potencia instalada nuclear en Europa..... | 127 |
| Gráfico N° 57: Proyección de potencia instalada nuclear en Asia | 129 |
| Gráfico N° 58: Proyección de potencia instalada nuclear en África..... | 131 |
| Gráfico N° 59: Proyección de potencia instalada nuclear en el mundo..... | 132 |
| Gráfico N° 60: Proyección de mínima potencia instalada nuclear realizada por OIEA | 133 |
| Gráfico N° 61: Proyección de máxima potencia instalada nuclear realizada por OIEA | 134 |
| Gráfico N° 62: Proyección de mínima y máxima potencia instalada nuclear realizada por OIEA...134 | |
| Gráfico N° 63: Proyección de potencia instalada nuclear al año 2030 realizada por IEA | 135 |
| Gráfico N° 64: Comparación de proyecciones de la presente Tesis con OIEA y con IEA | 136 |
| Gráfico N° 65: Diferencia entre la proyección de la presente Tesis con OIEA y con IEA | 136 |
| Gráfico N° 66: Cantidad de reactores en operación ordenados por tecnología [PRIS-IAEA]..... | 152 |

| | |
|--|-----|
| Gráfico N° 67: Proyección de potencia instalada mundial promedio | 163 |
| Gráfico N° 68: Proyección de demanda mundial de energía eléctrica | 164 |
| Gráfico N° 69: Proyección de generación mundial de energía eléctrica..... | 165 |
| Gráfico N° 70: Proyección de potencia instalada nuclear vs potencia instalada total mundial..... | 166 |
| Gráfico N° 71: Proyección de participación nuclear en la potencia instalada total mundial..... | 166 |
| Gráfico N° 72: Proyección de potencia instalada de energías renovables por tecnología [17] | 170 |
| Gráfico N° 73: Proyección de potencia instalada mundial de energías renovables total | 170 |
| Gráfico N° 74: Proyección de potencia instalada de fuentes fósiles por tecnología [17] | 171 |
| Gráfico N° 75: Proyección de potencia instalada mundial de fuentes fósiles total | 172 |
| Gráfico N° 76: Proyección de emisiones de CO2 en el mundo [17] | 173 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|-----|
| Figura N°1: Esquema simplificado del reactor de Three Mile Island - Unidad N°2 | 14 |
| Figura N°2: Corte del Nuevo Sarcófago Seguro construido sobre la Unidad N°4 de Chernobyl | 18 |
| Figura N°3: Epicentro del terremoto y centrales nucleares cercanas | 21 |
| Figura N°4: Generación nuclear suministrada y potencia nuclear en construcción en el año 2017 | 39 |
| Figura N°5: Localización de centrales nucleares planificadas en Turquía..... | 119 |
| Figura N°6: Esquema de una central térmica convencional | 138 |
| Figura N°7: Esquema de una central nuclear convencional..... | 138 |
| Figura N°8: Corte del recipiente de presión de Atucha II..... | 140 |
| Figura N°9: Edificio del reactor de la Central Nuclear Atucha I | 141 |
| Figura N°10: Montaje del turbogruppo de Atucha II | 143 |
| Figura N°11: Principales tecnologías de generación nuclear [Elaboración propia] | 144 |
| Figura N°12: Esquema de un reactor de tipo PWR | 145 |
| Figura N°13: Esquema de un reactor de tipo BWR | 146 |
| Figura N°14: Esquema de un reactor de tipo LWGR | 147 |
| Figura N°15: Esquema de un reactor de tipo PHWR-CANDU..... | 149 |
| Figura N°16: Esquema de un reactor de tipo GCR | 150 |
| Figura N°17: Esquema de un reactor de tipo FBR..... | 151 |
| Figura N°18: Núcleo del reactor CAREM (izq.) – avance de obra a julio de 2019 (der.) | 156 |
| Figura N°19: Concepto de las 6 tecnologías de reactores nucleares de Generación IV | 158 |
| Figura N°20: Proyecto ITER – avance de obra a abril de 2019 | 162 |
| Figura N°21: Emisiones de CO2 por tecnología [15] | 168 |

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi novia Johanna Andrea Cappa por el compañerismo con el que afrontamos todos los desafíos que se nos presentan día a día, pero particularmente quiero agradecerle por haberme apoyado y acompañado tanto en la cursada de la Maestría como en la elaboración de la presente Tesis.

De más está decir que también agradezco a Hugo y Guillermo por el apoyo incondicional que siempre me brindan.

Por último quería agradecer a mi amiga Natalia Stankevicius por sus observaciones y consejos.

1. INTRODUCCIÓN AL TEMA DE TESIS

En febrero de 2019 en el mundo hay 450 reactores nucleares en operación, con una capacidad instalada total cercana a los 400 GWe, abarcando aproximadamente el 11% de la generación total mundial. El factor de carga promedio de estos reactores es del 80%, mientras que en los reactores más modernos supera el 90%. Respecto a la vida útil, los nuevos reactores están diseñados para alcanzar los 60 años de operación a plena potencia.

La energía nuclear es un tipo de tecnología que ha demostrado gran capacidad y confiabilidad a lo largo de su historia. Si bien es considerada una industria de altísima complejidad, hoy en día 30 países cuentan con centrales nucleares en operación. Sin embargo, luego del accidente ocurrido en Fukushima en el año 2011, algunos países se replantearon la continuidad de sus programas nucleares, como por ejemplo: Alemania y Japón. Por otro lado, potencias como China, India y Rusia, están apostando fuertemente a la energía nuclear mediante la construcción de nuevos reactores: China (11 unidades), India (7 unidades) y Rusia (6 unidades).

Otro caso muy importante a destacar es que, ciertos países que aún no cuentan con energía nuclear, han tomado la decisión de incorporar dicha fuente de energía sus matrices. Algunos de esos países están en tratativas para comenzar la construcción de centrales nucleares y otros ya han tomado esa iniciativa, como por ejemplo: Emiratos Árabes Unidos (4 unidades en construcción), Bangladesh (2 unidades en construcción), Bielorrusia (2 unidades en construcción) y Turquía (1 unidad en construcción).

El caso particular de la República Argentina: es un país nuclear con una demostrada experiencia en el rubro, tiene más de 44 años de operación exitosa de centrales nucleares y más de 68 años de experiencia en investigación y desarrollo de tecnología nuclear en general. Actualmente se está construyendo una central nuclear de potencia prototipo de unos 32 MWe (CAREM) diseñada por especialistas de nuestro país. La República Argentina se ha convertido en potencia mundial, por ejemplo, en la fabricación y exportación de reactores nucleares de investigación y en la producción de radioisótopos para medicina nuclear.

En el año 2015 la Argentina firmó un acuerdo con China para la construcción de dos nuevos Reactores Nucleares en nuestro país (proyecto de IV y V Central Nuclear), cuyo inicio de construcción de una de ellas estaba previsto para principios del año 2016. A pesar de esto, el actual Gobierno Argentino ha decidido cancelar la construcción de la IV Central Nuclear de tecnología CANDU y postergar el proyecto de la V Central Nuclear del tipo PWR para el año 2022.

El futuro de la energía nuclear es incierto, por tal motivo para la presente tesis se busca estimar la potencia instalada nuclear mundial para el año 2030, en base a las decisiones políticas de los países que cuentan con centrales nucleares, y de los que aún no las poseen.

2. ENERGÍA NUCLEAR

2.1. Antecedentes

La producción de Energía Nuclear tuvo su inicio tras un hecho lamentable como lo fue la creación de la bomba atómica. Para la fabricación de la misma se necesitaron muchos años de investigación científica, desde el descubrimiento del electrón hasta el estudio de la fisión nuclear. Se sabía que en la fisión de un átomo como por ejemplo el Uranio, se liberaría gran cantidad de energía.

En el marco del Proyecto Manhattan, el 16 de julio de 1945 en el estado de Nuevo México de EE.UU., se detona la primera bomba atómica experimental, de 19 kilotones bajo el nombre clave de Trinity.

Luego de esta prueba “exitosa”, el Presidente de los Estados Unidos, Harry S. Truman, ordenó el lanzamiento de dos bombas atómicas sobre Japón: 06/08/1945 Hiroshima – 09/08/1945 Nagasaki, lo cual dio fin a la Segunda Guerra Mundial.

En 1949 Rusia realiza en Siberia su primera prueba atómica. En 1952 también Gran Bretaña se incorpora como potencia nuclear y posteriormente lo hacen Francia y China.

Tras el uso casi exclusivamente militar de la energía nuclear, el 17 de octubre de 1956 se inauguró en Calder Hall (Cumbria, Reino Unido) la primera planta comercial de energía nuclear del mundo, con una potencia de 196 MW. Fue inaugurada por la reina Isabel II y estuvo en funcionamiento durante casi 47 años hasta el 31 de marzo de 2003.

A principios de los años setenta, la crisis energética del petróleo acompañada por la volatilidad de su precio, el fuerte crecimiento de la demanda eléctrica y el prometedor futuro de la energía nuclear, proporcionó el impulso definitivo a esta tecnología dentro de los planes energéticos de muchos países industrializados, como por ejemplo EE.UU., Alemania, Canadá, Italia, China, Rusia, Kazajstán, Japón, etc. A su vez, otros países como México, Brasil, Argentina, Taiwán y Corea se prepararon para iniciar sus programas nucleares.

Los países que lograron desarrollar la energía nuclear, demostraron un gran avance en materia científico-tecnológica respecto del resto de los países.

La República Argentina comenzó los estudios para la construcción de la central nuclear Atucha I en el año 1964, convirtiéndose diez años después en el primer país de América Latina en poner en marcha una central nuclear de potencia.

2.2. Accidentes y su repercusión en el desarrollo nuclear

En la historia de la energía nuclear, al igual que en toda industria, han ocurrido accidentes e incidentes, los cuales en su gran mayoría no produjeron muertes ni emisiones de material radiactivo al medio ambiente.

Sin embargo hubo tres accidentes de gran importancia que vale la pena destacar: el accidente producido en la central nuclear de Three Mile Island - Pensilvania, EE.UU. en 1979, el accidente ocurrido en Chernobyl en 1986 y el accidente ocurrido en Fukushima en 2011.

A continuación se describen de manera conceptual los tres accidentes con sus conclusiones y repercusiones sobre la industria nuclear.

2.2.1. Accidente de Three Mile Island

- **INTRODUCCIÓN**

La central nuclear Three Mile Island (TMI) se compone de dos reactores de tipo PWR (tecnología conocida habitualmente por sus siglas en inglés, Pressurized Water Reactor - ver sección 5.4 de la presente tesis), con potencias instaladas de 786 MW (reactor TMI-1) y 900 MW (TMI-2).

El TMI-1 entró en servicio el 19 de abril de 1974 y el TMI-2 lo hizo en diciembre de 1978, de manera que este último sólo llevaba 90 días funcionando cuando se produjo el accidente. La empresa encargada de operar la central era la Metropolitan Edison Company (frecuentemente abreviada, MetEd).

El reactor TMI-1 se mantuvo al margen del accidente, ya que se trata de instalaciones independientes, y además el TMI-1 estaba en "parada fría", por recarga de combustible. TMI-1 sigue en operación y aunque su licencia expiraba en 2014 fue renovada hasta el 2034. En estos momentos está operado y gestionado por Exelon Nuclear, una filial de Exelon Corporation, empresa de distribución de energía con sede en Chicago.

A continuación en la figura N°1 se presenta un esquema conceptual de la Central de Three Mile Island, unidad N°2.

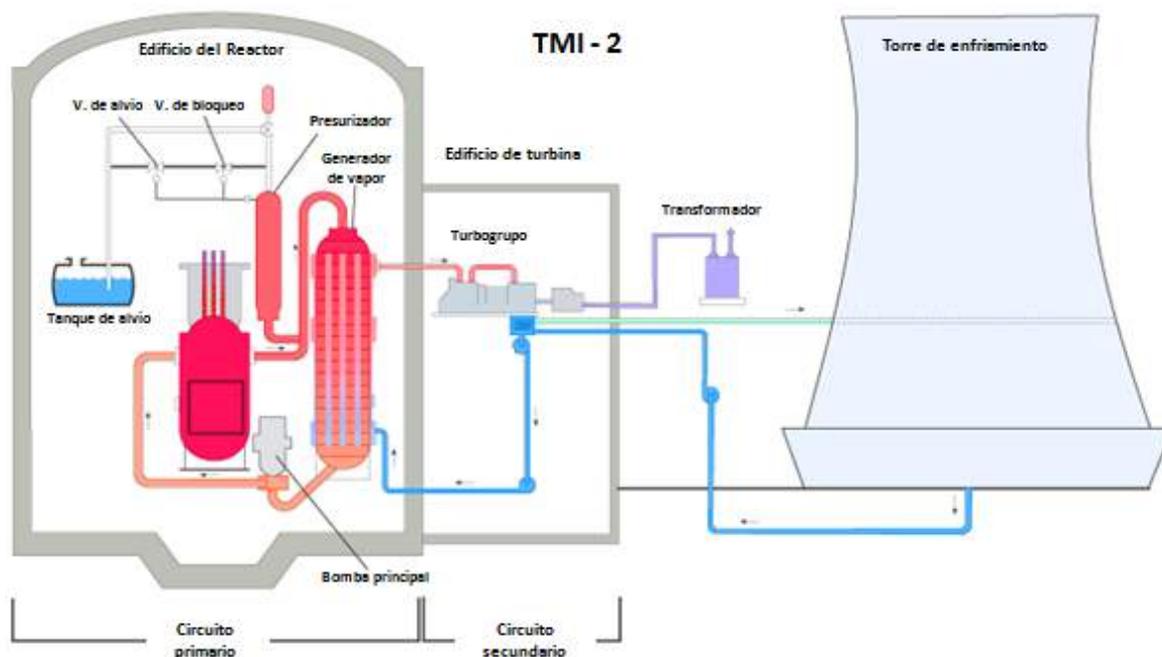


Figura N°1: Esquema simplificado del reactor de Three Mile Island - Unidad N°2

- **ACCIDENTE**

El accidente comenzó cerca de las 4:00 de la mañana del 28 de marzo de 1979, cuando se produjo un fallo en el circuito secundario: las bombas de agua de alimentación a los generadores de vapor salen de servicio por una falla eléctrica o mecánica (se desconoce). Al interrumpir el suministro de agua a los generadores de vapor (lado secundario), éstos disminuyen su nivel de agua y una protección retira de servicio tanto el turbo-grupo como el reactor de manera exitosa.

La presión y la temperatura en el circuito primario aumentan, debido a que el circuito secundario no puede extraer el calor residual del circuito primario. Esto es un suceso normal previsto por el sistema de protección del reactor. Para evitar que la presión alcance valores excesivos, el sistema de control automáticamente produce la apertura de una válvula de descarga de presión desde el presurizador hacia un tanque de alivio de presión.

La válvula debía cerrarse al disminuir la presión, aunque por un fallo mecánico no lo hizo. Las señales que llegaban a sala de control indicando que la válvula estaba trabada abierta, no fueron consideradas por el grupo de operadores, dado que se estima que operaban comúnmente con una “mini-pérdida” en esa válvula (indicación abierta o no cerrada). En consecuencia, la válvula trabada abierta ocasionó que la presión del refrigerante primario continuara disminuyendo.

El punto de menor presión del sistema primario pasó a ser la válvula trabada abierta, por tal motivo el nivel del tanque presurizador comenzó a aumentar hacia la válvula como consecuencia de un diferencial de presión. Esto generó un exceso de confianza en los operadores, quienes consideraron que si el presurizador estaba completo de agua, todo el núcleo también lo estaría por encontrarse en un nivel inferior al presurizador.

Esto fue un error de diagnóstico muy grave, dado que si bien el presurizador es un equipo que está en altura respecto al resto del circuito refrigerante, su aumento de nivel implicaba que el nivel en el núcleo del reactor estaba disminuyendo por la formación de una gran burbuja de vapor y por lo tanto descubriendo los elementos combustibles.

A las 6 de la mañana se produjo el cambio de turno en el personal de la sala de control. Al detectar el nuevo equipo las altas temperaturas que se estaban midiendo en la tubería y depósitos posteriores a la válvula de alivio, se procedió a cerrar una válvula auxiliar, cuando ya se habían perdido por esa vía 120.000 litros de refrigerante del circuito primario.

Luego de 165 minutos del comienzo del problema se activaron las alarmas por actividad, cuando el agua contaminada alcanzó los detectores. En ese momento los niveles de radiación en el líquido refrigerante del sistema primario era unas 300 veces mayor que los niveles esperados: esto fue una indicación clara de que había fisuras en los elementos combustibles.

En la sala de control no se sabía aún que el nivel de agua en el circuito primario era bajo y que aproximadamente la mitad del núcleo estaba sin refrigeración. Un grupo de trabajadores tomó lecturas manuales de los sensores de temperatura y obtuvo una muestra del agua del circuito primario. Unas horas después se comenzó a inyectar agua nueva al circuito primario y la temperatura del núcleo comenzó a disminuir. Se estima que un 40% del núcleo ya se había fundido. [1]

● CONSECUENCIAS

El accidente produjo un daño importante al núcleo del reactor, y una emisión de productos radiactivos al exterior ligeramente superior a la autorizada. Los efectos radiológicos sobre la población cercana a la central fueron nulos. Según las estimaciones realizadas por técnicos de la Comisión Reguladora Nuclear (NRC), del Departamento de Salud, Educación y Bienestar y de la Agencia de Protección Ambiental, se observó una dosis equivalente que representó un incremento del 1,5% respecto a la dosis debida a la radiación natural, lo cual se corresponde con un riesgo insignificante y no se registró alteración en ningún indicador de incidencia de cáncer sobre la población.

La descontaminación del reactor después del accidente necesitó de un proyecto difícil que duró 14 años. Comenzó en agosto de 1979 y no terminó oficialmente hasta diciembre de 1993, con un costo total cercano a los 975 millones de dólares.

● LECCIONES APRENDIDAS

El accidente cambió la forma de ver la seguridad en las plantas nucleares en occidente, y las previsiones, que muchas veces fueron consideradas innecesarias, comenzaron a aplicarse. Por ejemplo el caso del recipiente de confinamiento a prueba de pérdidas comenzó a ser considerado como un medio válido de sobrellevar accidentes no previstos.

Las enseñanzas que dejó el accidente de TMI fueron muchas, pero las que más se destacan son dos: el concepto de defensa en profundidad y la cultura de seguridad. Respecto de la cultura de seguridad ésta se define como una serie de conceptos, convicciones y comportamientos en los cuales la seguridad es lo primero.

Luego del accidente en Three Mile Island, muchos países comenzaron a considerar a los accidentes severos en el diseño de las centrales nucleares. Un accidente se lo considera severo cuando sus consecuencias exceden a las de los accidentes básicos de diseño para los cuales los sistemas de seguridad de la planta han sido diseñados. Según la IAEA (International Atomic Energy Agency) los accidentes severos son peores que los básicos de diseño y pueden provocar un significativo daño al núcleo del reactor.

La idea de considerar la posibilidad de accidentes severos condujo a establecer una forma de manejar este tipo de accidentes mediante técnicas especiales de gerenciamiento de los mismos que los eviten y en el peor de los casos los mitiguen.

A partir de 1980 casi todas las plantas de occidente habían implementado los planes de manejo ante accidentes severos que incluyen equipos y procedimientos como:

- Grupos generadores móviles para cubrir el caso de un apagón total de la red de energía eléctrica (SBO - Station Black Out) interna y externa.
- Procedimientos para asegurar la provisión de energía eléctrica a las cargas esenciales para la seguridad de la planta.
- Procedimientos para la despresurización voluntaria del circuito primario de los reactores tipo PWR en caso de caída de los sistemas de inyección de emergencia en alta presión.

2.2.2. Accidente de Chernobyl

- **INTRODUCCIÓN**

El reactor de Chernobyl se encuentra situado a 105 km al norte de Kiev y pertenece a la línea de reactores RBMK o LWGR (reactor de canal de alta potencia - ver sección 5.4 de la presente tesis).

Este diseño fue desarrollado en la década de 1960, en el contexto de la guerra fría. Sus características son únicas en cuanto a su diseño y combinación de sistemas, dispositivos y materiales, dado que sólo se utilizaron en la URSS. En general se puede decir que no se aplicaron los conceptos occidentales de diseño, en particular los de defensa en profundidad.

Este tipo de reactores originalmente eran utilizados para producción de plutonio y generación de energía. Entraron en operación comercial por primera vez en 1974.

El accidente de Chernobyl fue una combinación de un mal diseño de la central nuclear, que además no disponía de un recinto de contención, junto con los errores producidos por los operadores de la misma, dejando fuera de servicio voluntariamente varios sistemas de seguridad con el fin de realizar una prueba operativa; en el marco de un sistema en el que el entrenamiento era escaso, y en el que no existía un organismo regulador independiente. [2]

- **ACCIDENTE**

El accidente ocurrió el sábado 26 de abril de 1986 y es considerado, junto con el accidente nuclear de Fukushima en Japón en 2011, como el más grave en la Escala Internacional de Accidentes Nucleares (INES por sus siglas en inglés. Accidente mayor - nivel 7).

Aquel día se estaba experimentando con el reactor para comprobar si la inercia del turbogruppo podía generar suficiente energía para alimentar las bombas de refrigeración en caso de pérdida de suministro eléctrico externo (hasta que arrancaran los generadores diésel de emergencia).

La prueba se realizó fuera de fecha y fuera de especificación, combinada con varias fallas graves de diseño de la central y con la violación de sistemas de seguridad por parte de los operadores de la misma: todo esto provocó un aumento súbito de potencia en el reactor 4 y un sobrecalentamiento del núcleo del reactor. A alta temperatura se produce una reacción entre el agua y los metales del núcleo lo que liberó cantidades significativas de gas hidrógeno y una futura explosión del mismo.

La explosión causó directamente la muerte de 2 trabajadores y forzó al gobierno de la Unión Soviética a la evacuación repentina de 116000 personas correspondiente a un área de 30 km de radio alrededor de la central. [2]

● CONSECUENCIAS

Inmediatamente después del accidente se construyó un “sarcófago”, para aislar el interior del exterior, dado que había sufrido una degradación en el tiempo por diversos fenómenos naturales.

En noviembre de 2016, treinta años después de la tragedia, se inauguró un nuevo sarcófago al que se denominó "Nuevo Sarcófago Seguro" (NSC, por sus siglas en inglés), una estructura móvil, la mayor construida hasta la fecha en el mundo.

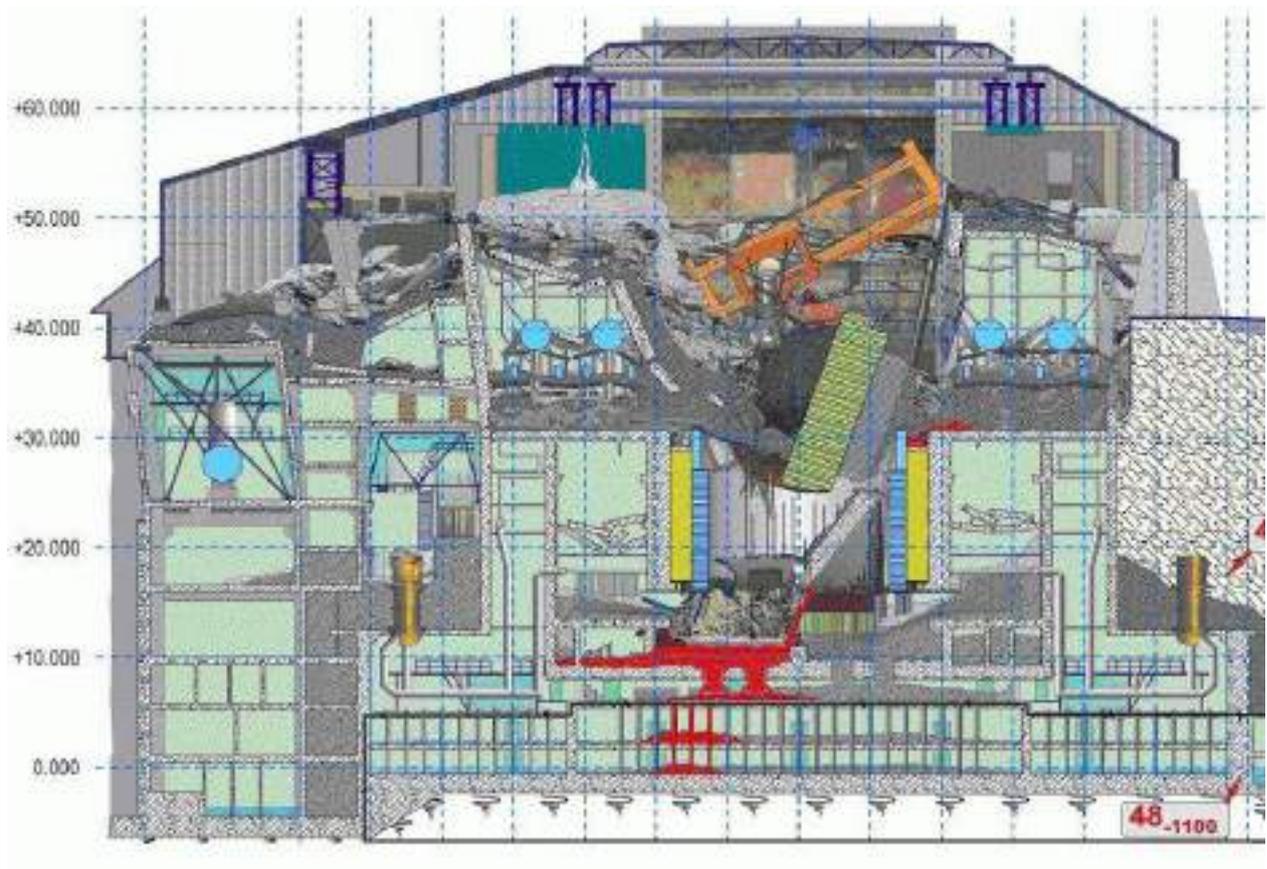


Figura N°2: Corte del Nuevo Sarcófago Seguro construido sobre la Unidad N°4 de Chernobyl

Los efectos del accidente de Chernobyl han sido evaluados por organismos internacionales, fundamentalmente por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) y la Organización Mundial de la Salud (OMS), quien en 2005 emitió un informe denominado “Chernobyl, la verdadera escala del accidente”. [3]

Según el informe de la OMS, no llegan a 50 las defunciones atribuidas directamente a la radiación liberada por el accidente de Chernobyl. Casi todas las muertes directas del accidente fueron de trabajadores de servicios de emergencia que sufrieron una exposición intensa y fallecieron a los pocos meses del mismo.

La contaminación provocada por el accidente ha causado alrededor de 4.000 casos de cáncer de tiroides, principalmente en personas que eran niños o adolescentes en el momento del accidente, y al menos nueve niños han muerto de cáncer de tiroides.

Uno de los daños más importantes producidos en la población es el impacto psicológico derivado del desconocimiento del efecto de la radiación y las informaciones incorrectas que se prodigaron. [2]

- **LECCIONES APRENDIDAS**

Después del accidente de la central nuclear de Chernobyl, las compañías eléctricas del mundo, propietarias de las centrales nucleares, fundaron la Asociación Mundial de Operadores Nucleares (WANO), con el objetivo de alcanzar los más altos niveles de seguridad y fiabilidad en la operación de las centrales nucleares, a través del intercambio de información técnica, de la comparación y comunicación entre sus miembros.

2.2.3. Accidente de Fukushima

- **INTRODUCCIÓN**

La central eléctrica de Fukushima está ubicada en la costa del Pacífico en la Prefectura de Fukushima en Japón. Cuenta con seis reactores nucleares del tipo BWR (tecnología conocida habitualmente por sus siglas en inglés, Boiling Water Reactor - ver sección 5.4 de la presente tesis) que juntos constituyen uno de los 25 mayores complejos de centrales nucleares del mundo, con una potencia total de 4,7 GW. Fue construida y gestionada independientemente por la compañía japonesa TEPCO.

Las características, potencias y estado de los reactores al momento del terremoto del 11 de Marzo del 2011 se resumen a continuación:

| UNIDAD | TIPO DE REACTOR | ESTADO | POTENCIA |
|--------|-----------------|-------------------|----------|
| I | BWR | EN OPERACIÓN | 460 |
| II | BWR | EN OPERACIÓN | 784 |
| III | BWR | EN OPERACIÓN | 784 |
| IV | BWR | FUERA DE SERVICIO | 784 |
| V | BWR | FUERA DE SERVICIO | 784 |
| VI | BWR | FUERA DE SERVICIO | 1100 |

Tabla N°1: Estado de las unidades de Fukushima previo al accidente

- **ACCIDENTE**

El origen del accidente fue un terremoto de grado 9 en la escala de Richter, ocurrido cerca de la costa noroeste de Japón, siendo el terremoto más grande en la historia de Japón y el quinto terremoto registrado más grande del mundo. A consecuencia del terremoto se produjo un tsunami con olas que llegaron a superar los 40 metros de altura.

El tsunami ocasionó la pérdida de 21.586 vidas humanas y en su destrucción masiva dejó sin alimentación eléctrica a la central nuclear de Fukushima Daiichi, ubicada en la costa noreste de Japón.

A continuación se presenta una imagen aérea de Japón en donde se puede observar la envergadura del tsunami con su epicentro y la ubicación de los complejos nucleares.



Figura N°3: Epicentro del terremoto y centrales nucleares cercanas

A consecuencia del terremoto, los reactores de Fukushima que se encontraban en operación (unidades I, II y III), salieron de servicio automáticamente de manera exitosa. Para refrigerar este tipo de centrales nucleares se necesita energía eléctrica, en primera instancia suministrada por la red principal y, de perderse ésta, la central se abastece de energía de una red auxiliar.

A causa del terremoto, tanto la red eléctrica principal como la auxiliar se perdieron como consecuencia de la rotura de torres de alta tensión. Por tal motivo, las centrales nucleares cuentan por diseño con mecanismos redundantes con generadores diesel de emergencia diseñados para este tipo de eventos muy poco frecuentes. Al ser requeridos, los generadores diesel arrancaron y comenzaron a suministrar energía eléctrica a la central sin inconvenientes. A las 15:41 impacta sobre la central una ola de unos 15 m de altura, la cual arrasó con los generadores diesel de emergencia y dejó sin alimentación a los componentes de seguridad.

Como consecuencia de la falta de suministro eléctrico y la imposibilidad de refrigerar los núcleos de los reactores, surgieron evidencias de una fusión parcial de los mismos en las unidades 1, 2 y 3. A su vez se produjeron explosiones de hidrógeno que destruyeron el revestimiento superior de los edificios 1, 3 y 4, y una explosión que dañó el tanque de contención en el interior del reactor 2. También se generaron múltiples incendios en la unidad número 4. Además, los combustibles gastados de las unidades 1-4, almacenados en piletas, comenzaron a sobrecalentarse como consecuencia de la falta de refrigeración.

Dada la magnitud del incidente las autoridades declararon inmediatamente el “estado de emergencia nuclear”. Se evacuó a la población residente en las zonas adyacentes con un aumento progresivo del perímetro de seguridad (hasta los 40 kilómetros de radio) y se movilizaron las fuerzas armadas para controlar la situación. En el transcurso de los días se fueron tomando nuevas decisiones, como inyectar agua marina y ácido bórico en alguno de los reactores, suministrar yoduro de potasio a la población o desplazar los vuelos de la aviación civil del entorno de la central afectada. Las medidas adoptadas, tanto las dirigidas a controlar el accidente nuclear como las enfocadas a garantizar la estabilidad del sistema financiero Japonés, fueron respaldadas por organismos tales como la OMS o el Fondo Monetario Internacional (FMI). [4]

● CONSECUENCIAS

El accidente fue considerado inicialmente de nivel 4 en Escala Internacional de Eventos Nucleares (escala INES, por sus siglas en inglés). Aunque en los días siguientes la situación se agravó y el accidente nuclear acabó alcanzando el nivel 7, el mismo que el accidente de la central nuclear de Chernobyl.

La ausencia de un muro de contención adecuado para impedir que los tsunamis alcancen a la central de Fukushima, permitió que la ola generada (de 15 metros de altura en la central y hasta 40 metros en otras zonas) penetrara sin oposición alguna. La presencia de numerosos sistemas críticos en áreas inundables facilitó que se produjera una cascada de fallos tecnológicos, culminando con la pérdida completa de control sobre la central y sus reactores. [4]

Respecto al daño en las personas, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR) señaló que “no se han observado muertes o enfermedades graves en los trabajadores y la población general expuestos a la radiación a raíz del accidente” y que “las dosis recibidas por la población general, tanto las registradas durante el primer año como las estimadas para toda la vida, son por lo general bajas o muy bajas. No se prevé un aumento discernible de la incidencia de efectos en la salud relacionados con la radiación entre la población general expuesta y su descendencia”. [5]

● LECCIONES APRENDIDAS

Tras el accidente, WANO ha identificado puntos de mejora respecto de la seguridad en más de 460 plantas de energía nuclear en todo el mundo, principalmente relacionados con: preparación para emergencias, disponibilidad de generadores diesel de emergencia, plan de apoyo de emergencias, gestión de accidentes severos, notificación temprana de eventos, almacenamiento de combustible en la planta, fundamentos de seguridad del diseño, frecuencia de revisión por pares, frecuencia y eficiencia de auditorías.

En abril de 2018 WANO anunció la finalización de los proyectos de mejoras implementados en todas las centrales nucleares, indicando que se han optimizado los niveles de seguridad.

A pesar de las medidas de mejora implementadas, varios países se replantearon sus políticas nucleares, por ejemplo:

- En Alemania, la Canciller Angela Merkel, tras reunir un gabinete de crisis convocado con motivo de la situación en Japón, comunicó que se debía comprobar la seguridad de las 17 centrales nucleares existentes en el país. Se estableció una moratoria de tres meses sobre la ley aprobada en septiembre para extender una media de doce años la vida de las centrales nucleares alemanas. El día 15 de marzo, Merkel anunció el cierre preventivo de siete de las 17 centrales nucleares activas, aquellas construidas antes de 1980. El cierre duraría al menos tres meses.
- En España, la organización Ecologistas en Acción pidió el adelanto del cierre de la central nuclear de Garoña, cuyo modelo de reactor coincide con los reactores de Fukushima, fabricados por General Electric, todos en el mismo año, organizando una concentración para pedir el cierre de las centrales nucleares.
- El Comisario europeo de Energía, Günther Oettinger, afirmó que debe comprobarse rigurosamente la seguridad en las centrales más antiguas sin descartar el cierre de aquellas que fuese necesario.
- En Suiza la Ministra de Energía, Doris Leuthard, anunció que el gobierno había decidido suspender todos los procesos de autorización de nuevas centrales nucleares hasta que se examinase la seguridad de las ya construidas. Se realizaría una inspección federal para analizar las causas exactas de los accidentes de Japón, teniéndola en cuenta para decidir si se revisan las normas al respecto en Suiza.
- El gobierno de Austria (cuya constitución prohíbe la instalación de plantas nucleares en su territorio) pidió que se llevaran a cabo pruebas de resistencia en todas las centrales nucleares europeas para revisar sus niveles de seguridad.

- En Chile se generó una cierta controversia sobre la instalación de centrales nucleares, a raíz de que el gobierno firmó un acuerdo de cooperación con el gobierno de los Estados Unidos para la capacitación de personal chileno en materia de Energía Nuclear.
- En Italia se convocó un referéndum sobre la energía nuclear, que se celebró el lunes 13 de junio de 2011 (aunque había sido convocado antes del Accidente de Fukushima). La población rechazó todos los temas planteados con una participación superior al 50 % (con rechazos en torno al 95%) por lo que las consultas pasaron a ser vinculantes para el Gobierno.

El accidente de Fukushima ocurrido en 2011 trajo como consecuencia una marcada merma en la generación nuclear mundial, que si bien está recuperándose año tras año, aún no ha alcanzado sus estándares previos al accidente, como se puede ver a continuación.

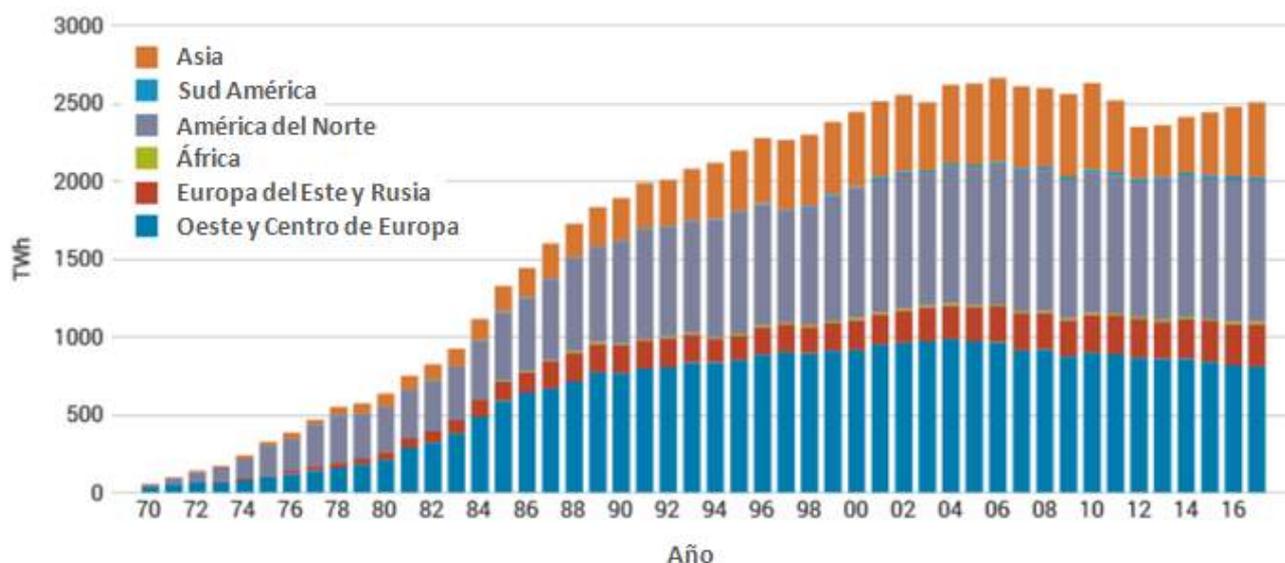


Gráfico N° 1: Evolución de la energía suministrada con generación nuclear en el mundo [PRIS-IAEA]

2.3. Centrales nucleares: estado del arte a febrero de 2019

2.3.1. Centrales Nucleares en operación

- **CANTIDAD DE CENTRALES NUCLEARES [6]**

En febrero de 2019 se encuentran operables 450 centrales nucleares de potencia distribuidas en 30 países, totalizando una capacidad instalada de 396.902 MWe, lo cual representa aproximadamente el 11% de la capacidad total de generación de energía en el mundo.

El país con mayor cantidad de centrales nucleares es EE.UU., el cual tiene 98 unidades operativas, seguido por Francia con 58, China con 46 en total, Japón con 39 (8 en operación, 31 en revisión) y Rusia con 35. Luego le siguen República de Corea con 24, India con 22 y Canadá con 19.

Estos ocho países nombrados junto con los 22 países nucleares restantes, están representados a continuación en el siguiente gráfico en orden decreciente, según la cantidad de centrales operativas que tiene cada uno de ellos.

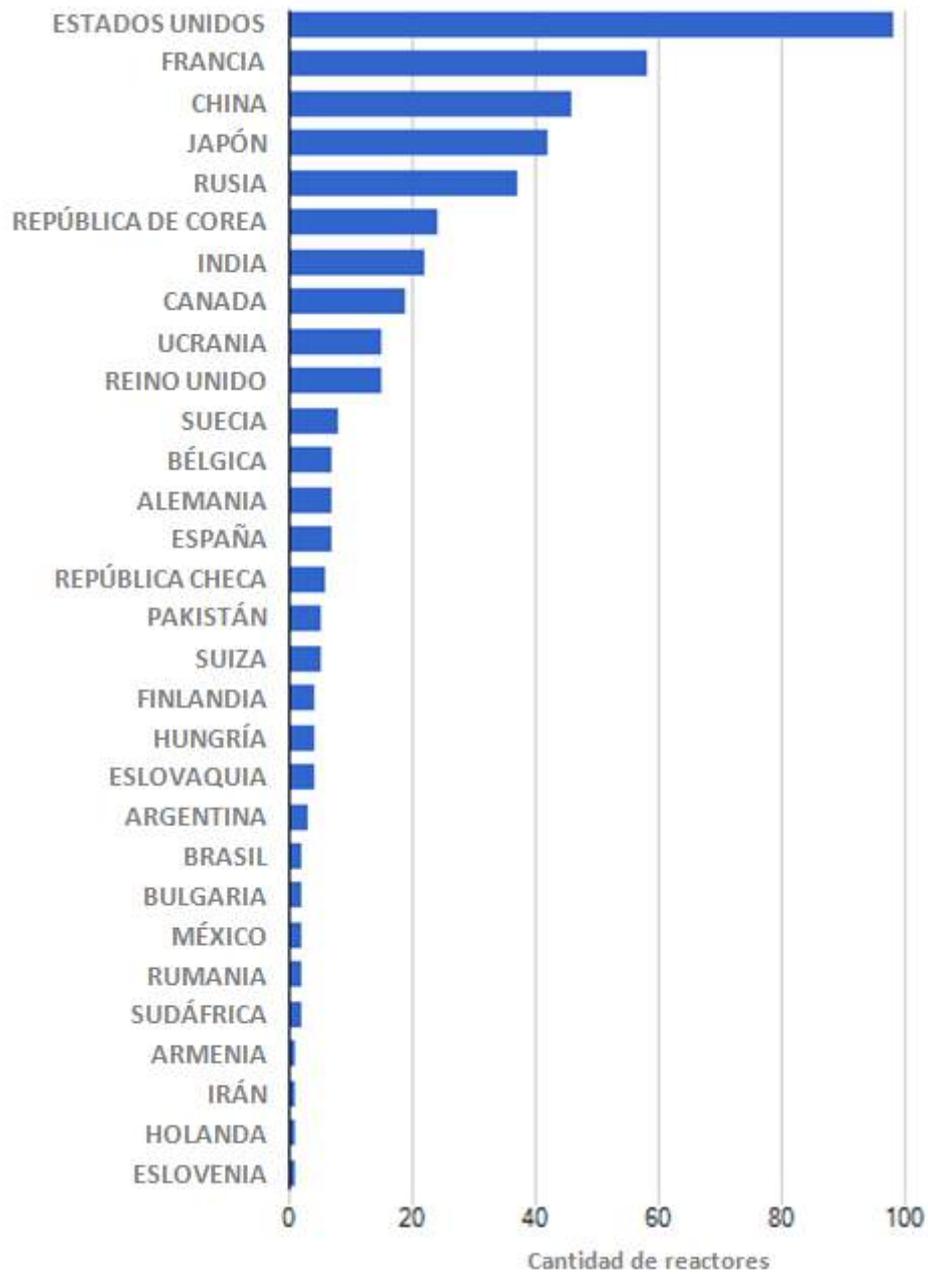


Gráfico N° 2: Reactores Nucleares en operación por país a febrero de 2019 [PRIS-IAEA]

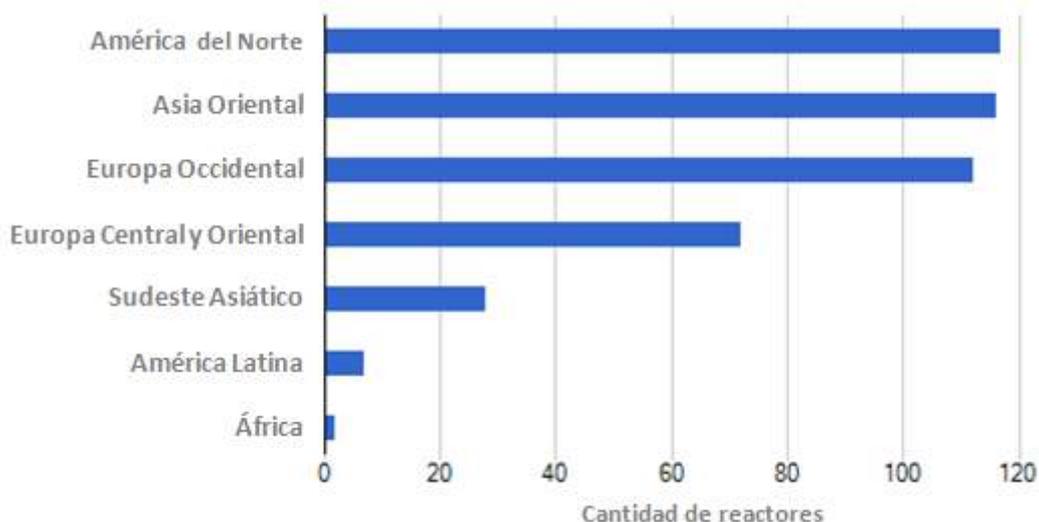


Gráfico N° 3: Reactores Nucleares en operación por región a febrero de 2019 [PRIS-IAEA]

A continuación se presenta la evolución de la cantidad de reactores operables en el mundo desde el año 2000 hasta febrero de 2019:

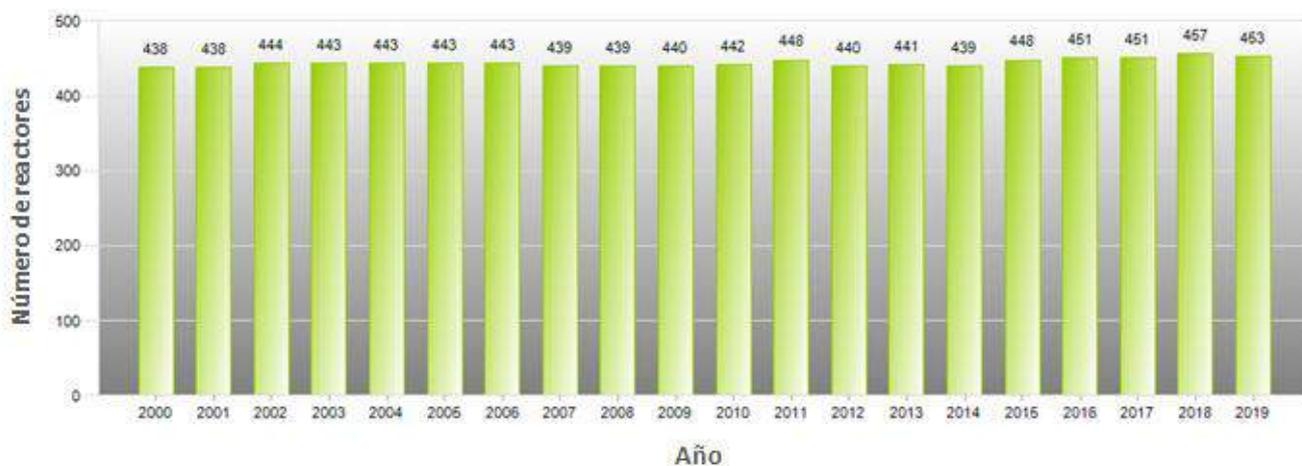


Gráfico N° 4: Evolución de la cantidad de reactores en operación en el mundo [PRIS-IAEA]

Se puede observar una merma en la cantidad de reactores operables en el año 2012 debido a que varias centrales nucleares fueron cerradas temporal o permanentemente a causa del accidente ocurrido en Fukushima en el año 2011. Luego del 2012 la tendencia vuelve a incrementarse hasta alcanzar su récord histórico en 2018 de 457 centrales nucleares operativas en el mundo. A enero de 2019 se aprecia una merma de 7 unidades totalizando 450 operativas.

● CAPACIDAD INSTALADA

La capacidad instalada neta mundial de energía nuclear a febrero de 2019 es de 399370 MWe. Acorde a la cantidad de reactores, se observa una disminución de la capacidad instalada entre 2011 y 2012 para luego recuperarse y alcanzar su máxima capacidad histórica en 2018. A febrero de 2019 se aprecia una disminución de la capacidad instalada nuclear dado que la cantidad de reactores operables disminuyó en 4 unidades.

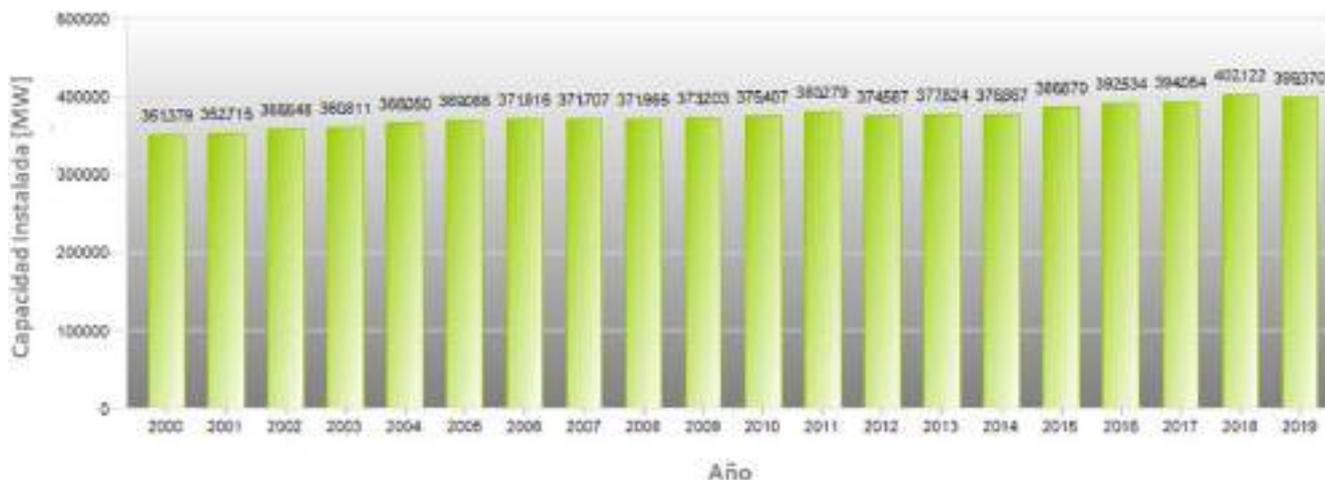


Gráfico N° 5: Evolución de la capacidad instalada nuclear mundial [PRIS-IAEA]

● PARTICIPACIÓN NUCLEAR POR PAÍS

El país con mayor cantidad de reactores en operación es EE.UU. con 98 unidades operativas. Sin embargo, la participación de la energía nuclear en la generación es sólo de un 20% (debido a su gran demanda de energía eléctrica), posicionando a EE.UU. en la mitad de la tabla respecto de los demás países. Por otra parte, Francia es el país con mayor participación nuclear (71,6%) en la matriz eléctrica con un total de 58 reactores en operación.

En el caso de Japón, cabe destacar que luego del accidente ocurrido en Fukushima en marzo de 2011, se detuvo la operación de la totalidad de las centrales nucleares del país (54 centrales operativas previo al accidente), para someterlas a un proceso de evaluación estricto de la seguridad por parte del ente regulador nuclear japonés (NRA). A partir del año 2013, este organismo comenzó a autorizar el reinicio de la actividad en algunas centrales, que recién a fines de 2015 comenzaron a operar. Es por esto que a pesar de tener 39 centrales nucleares operables, éste país tiene actualmente nueve centrales en operación, resultando una participación nuclear en la actualidad del 6,2% respecto a la generación total.

Rusia y China cuentan con 37 y 46 reactores en operación respectivamente. La participación nuclear en el caso de Rusia es del 17,9%, mientras que en China es del 4,2% (debido al alto consumo energético del país, que lo posiciona como el mayor demandante de energía eléctrica a nivel mundial). Este porcentaje se incrementará considerablemente en los próximos años dado que actualmente China tiene 11 centrales nucleares en construcción, proyectando una potencia de 10.982 MW. El resto de los países del mundo con generación nucleoelectrica (sin contar a EE.UU, Francia, China, Japón y Rusia) poseen menos de 25 reactores en operación y la participación nuclear en su generación es menor al 45%, exceptuando los casos de Ucrania, Eslovaquia, Bélgica y Hungría, donde más de la mitad de su generación proviene de fuentes nucleoelectricas.

A continuación se presenta mediante un gráfico la participación nuclear y el número de reactores en operación de cada uno de dichos países. Las barras azules indican el porcentaje de participación de energía nuclear en la matriz, mientras que las barras rojas representan el número de reactores en operación de cada uno de los países nucleares.

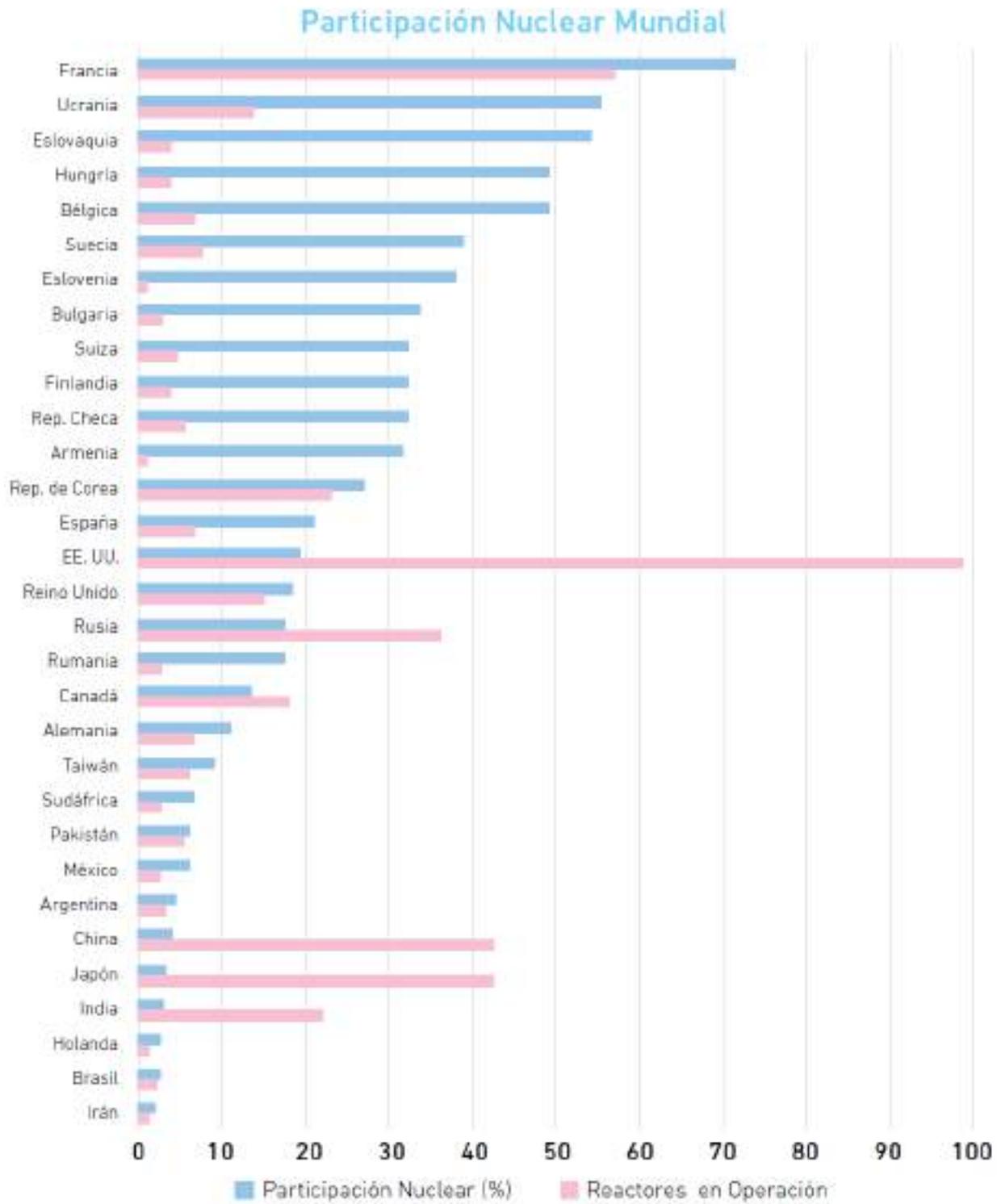


Gráfico N° 6: Participación nuclear y reactores nucleares por país [7]

● ANÁLISIS DE EDAD Y POTENCIAS DE REACTORES OPERATIVOS

Los reactores actualmente operativos son muy variados en tecnología, potencia y antigüedad. Respecto de ésta última característica, en el mercado se encuentra una amplia gama de edades de centrales nucleares: desde reactores puestos en marcha recientemente (año 2019) hasta reactores cuyo inicio de operación se dio hace unos 50 años.

A continuación se presenta una gráfica con la cantidad de reactores operativos actualmente respecto de su antigüedad:

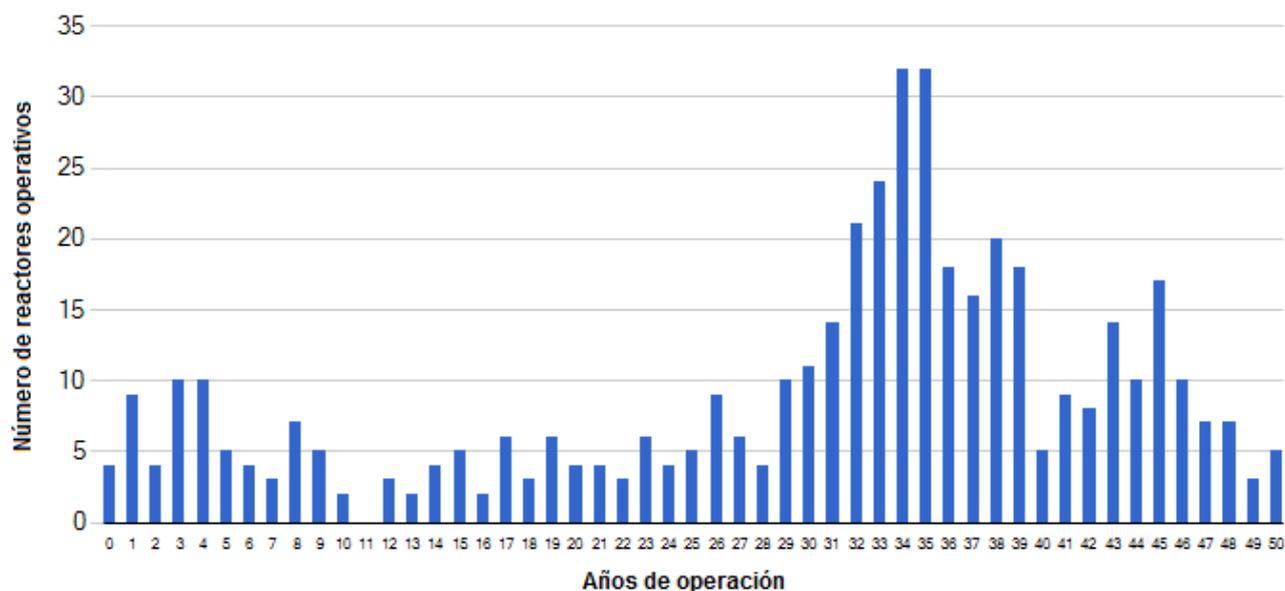


Gráfico N° 7: Cantidad de reactores operativos según antigüedad [PRIS-IAEA]

Las centrales nucleares han demostrado gran capacidad operativa durante toda su vida útil, sin embargo, ciertos países tomaron la decisión de retirar de servicio paulatinamente las centrales más antiguas.

La decisión de retiro de servicio de centrales depende de cada país y del estado general de las mismas. Si bien hay países que retirarán de servicio sus centrales más antiguas, otros países procederán a extenderles sus vidas operativas por 10 o más años de operación.

Otro aspecto importante a destacar es la potencia de las centrales más antiguas respecto de las potencias de las centrales modernas. A continuación se presenta un gráfico en donde se promedian las potencias de las centrales nucleares respecto de su antigüedad.

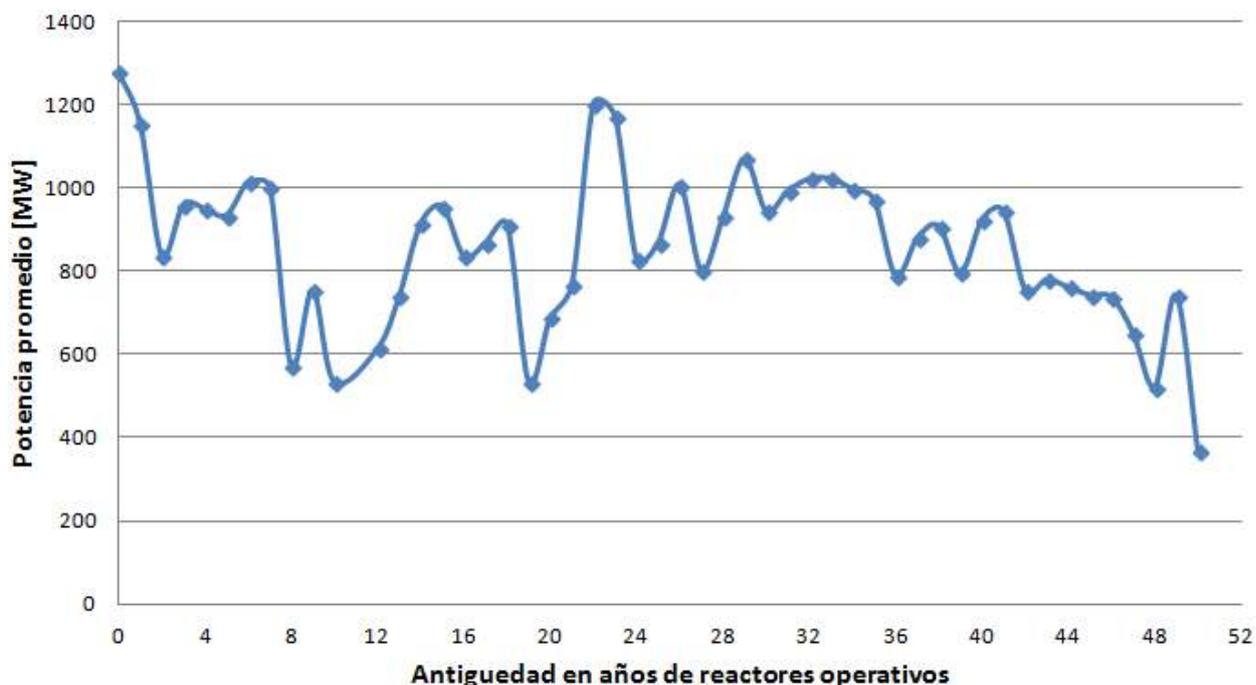


Gráfico N° 8: Potencia promedio de reactores según su antigüedad [PRIS-IAEA]

De la información presentada se destaca que las centrales más antiguas tienen en promedio la mitad de capacidad que las centrales instaladas en el presente. Por lo tanto, el retiro de servicio de las centrales más antiguas no afecta de manera significativa a la potencia instalada nuclear en el mundo, dado que si de cada dos unidades que se retiren de servicio, una central nueva se conecta a la red, la potencia instalada nuclear mundial permanece prácticamente constante.

2.3.2. Centrales Nucleares en construcción

La industria de la construcción de centrales nucleares a lo largo de la historia tuvo varios países protagonistas en el diseño y exportación: EE.UU, Rusia, Canadá, Francia y Alemania entre otros. Al día de hoy, la industria de exportación de centrales nucleares está comandada principalmente por tres proveedores: Rusia, China y República de Corea (en ese orden de protagonismo en el mercado).

A febrero de 2019 hay 55 reactores nucleares en construcción en el mundo. China es el país con mayor cantidad de unidades en construcción (11 unidades, incluidas 2 de Taiwán), por lo que puede considerarse como el país más activo de la industria nuclear al presente. Estas futuras incorporaciones suman un total de 10.982 MWe de potencia adicional al parque de generación chino.

Otros países que realizan una gran apuesta por la nucleoelectricidad son India, con siete reactores en construcción representando una potencia de 4.824 MWe y Rusia, con seis reactores en construcción con una potencia de 4.573 MWe, todos desarrollados con tecnología propia. Además de las centrales en construcción en su propio territorio, y como se mencionó previamente, Rusia es el principal país exportador de centrales nucleares al momento.

La República de Corea y Emiratos Árabes Unidos cuentan a la fecha con cinco y cuatro reactores en construcción respectivamente (6.700 y 5.380 MWe)

En el caso de Argentina, sigue en construcción el prototipo de diseño 100% nacional denominado CAREM, con una potencia proyectada de 32 MWe.

A continuación se presenta un gráfico con los reactores en construcción por país en la actualidad:

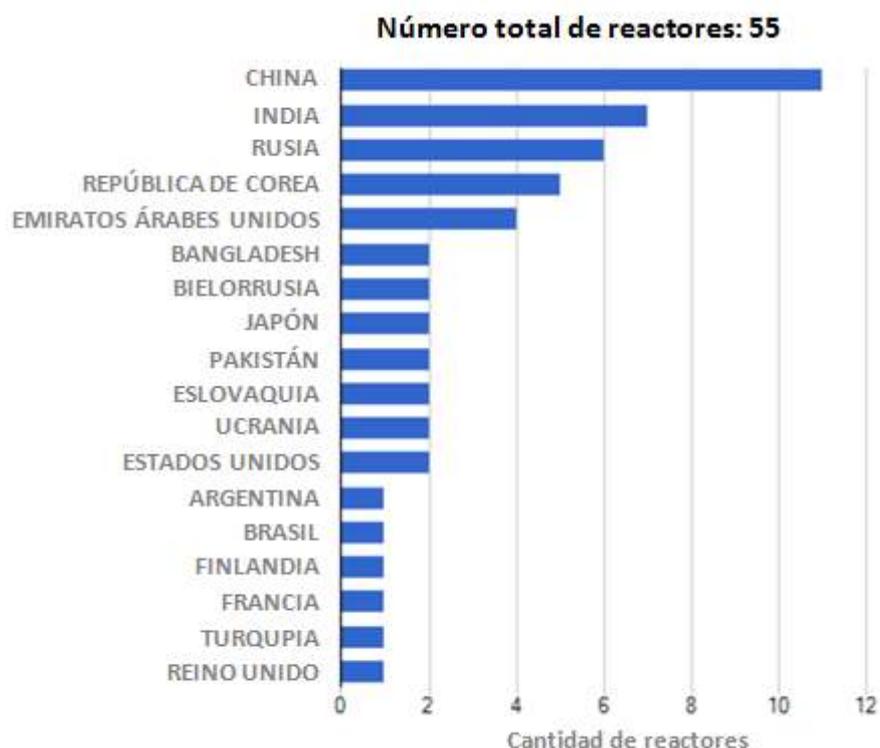


Gráfico N° 9: Reactores nucleares en construcción por país a enero de 2019 [PRIS-IAEA]

En el siguiente gráfico se presenta la evolución de la cantidad de unidades que comenzaron su construcción por año en el mundo. Se destaca una marcada tendencia ascendente en las construcciones iniciadas desde el 2003 hasta el 2010, año previo al accidente ocurrido en Fukushima.

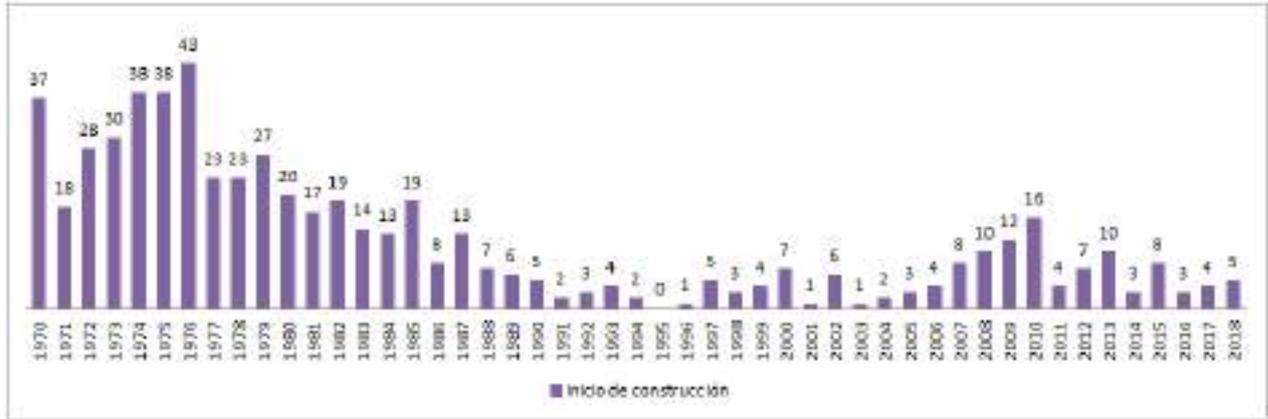


Gráfico N° 10: Cantidad de construcciones de centrales nucleares iniciadas por año [PRIS-IAEA]

2.3.3. Centrales Nucleares retiradas de servicio

Desde los inicios de la energía nuclear hasta la fecha se han retirado de servicio 173 reactores en todo el mundo, por diferentes motivos. A continuación se incluye un gráfico de barras en donde se representa la cantidad de centrales nucleares retiradas de servicio por país.

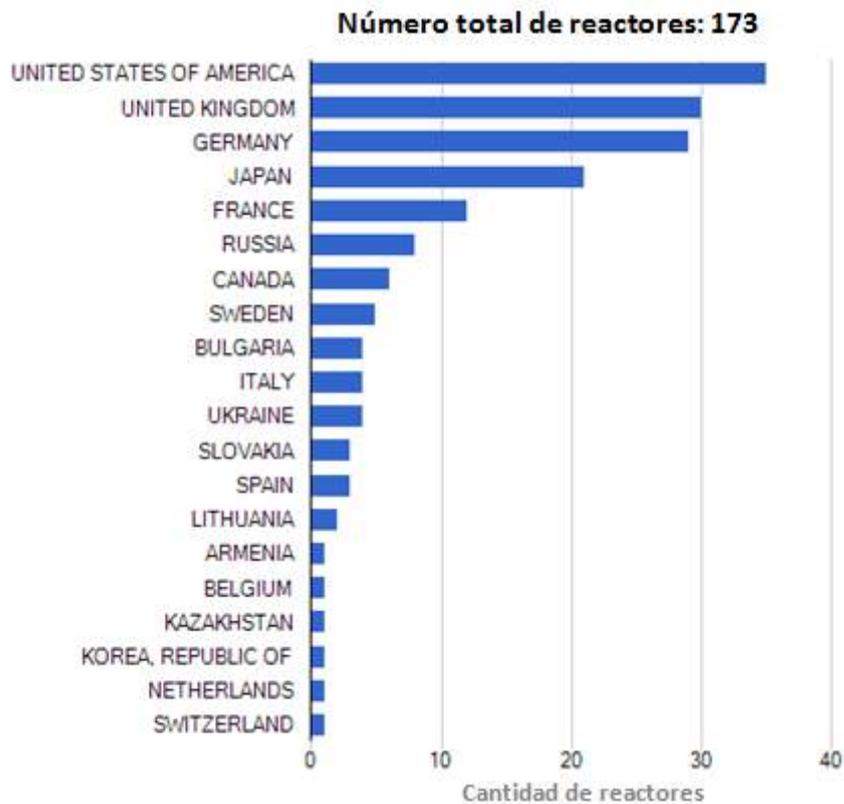


Gráfico N° 11: Cantidad de centrales nucleares retiradas de servicio por país [PRIS-IAEA]

Al realizar un análisis de las centrales retiradas de servicio por año, se evidencian dos grandes salidas de servicio masivas luego de los dos principales accidentes nucleares: 1986 - Chernobyl y 2011 - Fukushima, como se muestra a continuación.

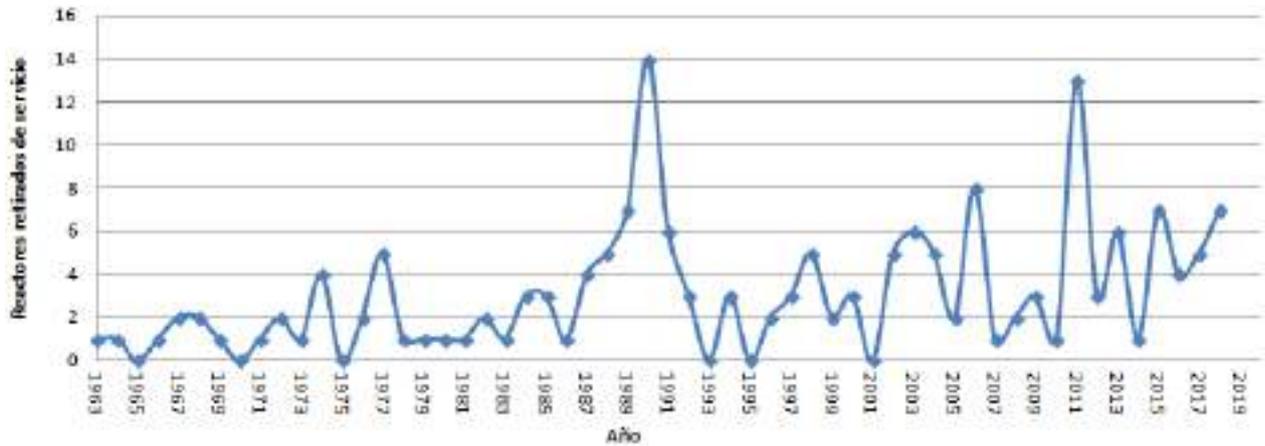


Gráfico N° 12: Cantidad de centrales nucleares retiradas de servicio por año [PRIS-IAEA]

Sin embargo, si se analiza la potencia nuclear retirada anualmente, se evidencia que luego del accidente ocurrido en 1986 en Chernobyl, la potencia nuclear retirada fue menos de la mitad en comparación con la retirada luego del accidente ocurrido en 2011 en Fukushima (se retiraron de servicio menos centrales post Fukushima que post Chernobyl).

Esto se explica dado que las centrales retiradas entre los años 1986 y 1992 tenían mucha menos capacidad que las retiradas entre 2011 y 2014, por tratarse de tecnologías más antiguas. En el siguiente gráfico se presenta la potencia nuclear retirada de servicio por año:

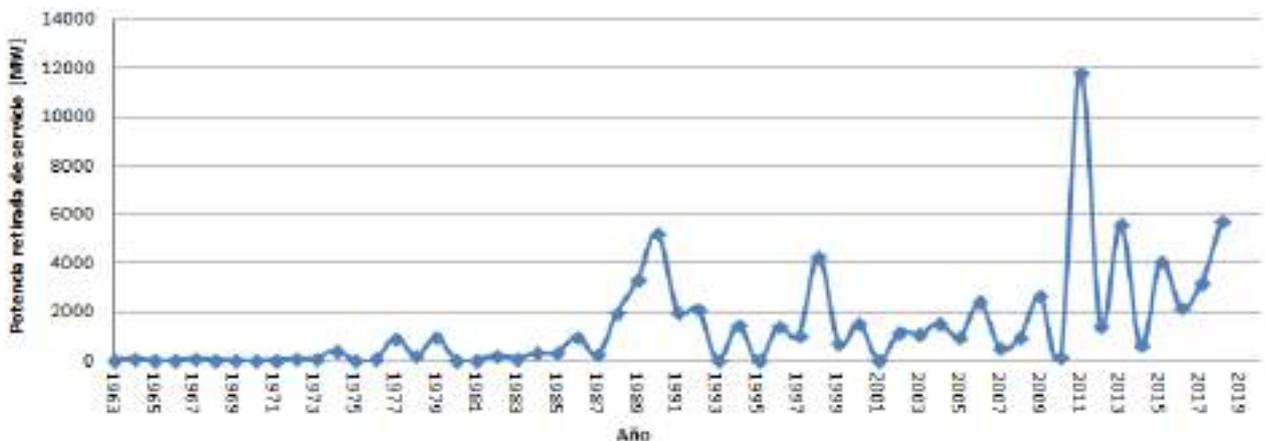


Gráfico N° 13: Potencia nuclear retirada de servicio por año [PRIS-IAEA]

A pesar de esto, la potencia nuclear retirada de servicio a lo largo de la historia es menor al 20% si se la compara con la potencia instalada bruta nuclear actual (76.000 MW retirados respecto de 400.000 MW instalados actualmente).

A continuación se representa la potencia acumulada retirada de servicio respecto de la cantidad de centrales retiradas. Se evidencia que las primeras 100 centrales nucleares dadas de baja acumulan solamente una potencia cercana a los 30.000 MW. Esto se debe a la baja capacidad de las centrales mas antiguas. Sin embargo, las últimas 73 centrales dadas de baja acumulan una potencia superior a los 45.000 MW.

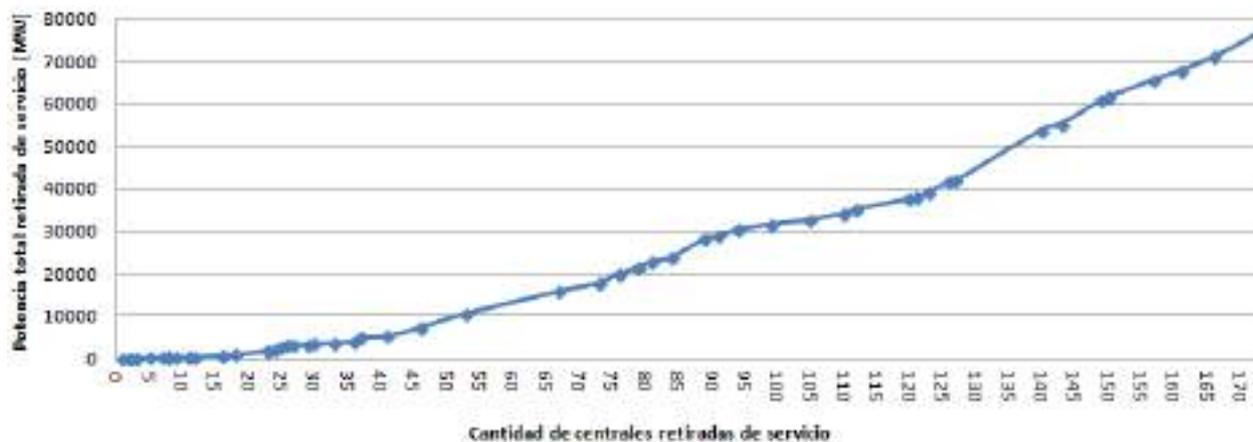


Gráfico N° 14: Potencia acumulada según cantidad de centrales retirada de servicio [PRIS-IAEA]

A continuación se listan los principales motivos por los cuales ciertos países han decidido retirar de servicio centrales nucleares:

- La tecnología, equipamiento o proceso utilizado se ha vuelto obsoleto (“Obsoleto”).
- El proceso o tecnología utilizada han dejado de ser rentables (“Rentabilidad”).
- Fin de licencia de operación o cambios en los requerimientos de la misma (“Licencia”).
- Ocurrencia de algún incidente o accidente que imposibilita su continuidad (“Incidente”).
- Motivos tecnológicos no costeables (“Tecnología”).
- Motivos económicos (“Economía”).
- Baja aceptación pública o decisiones políticas (“Aceptación”).
- Falla o deterioro de algún componente importante (“Equipamiento”).
- Motivos no especificados (“Otros”).

En el siguiente gráfico se presentan las salidas de servicio según motivos estipulados por país. Se aclara que la mayoría de los países han declarado más de un motivo por los cuales tomaron dichas decisiones.

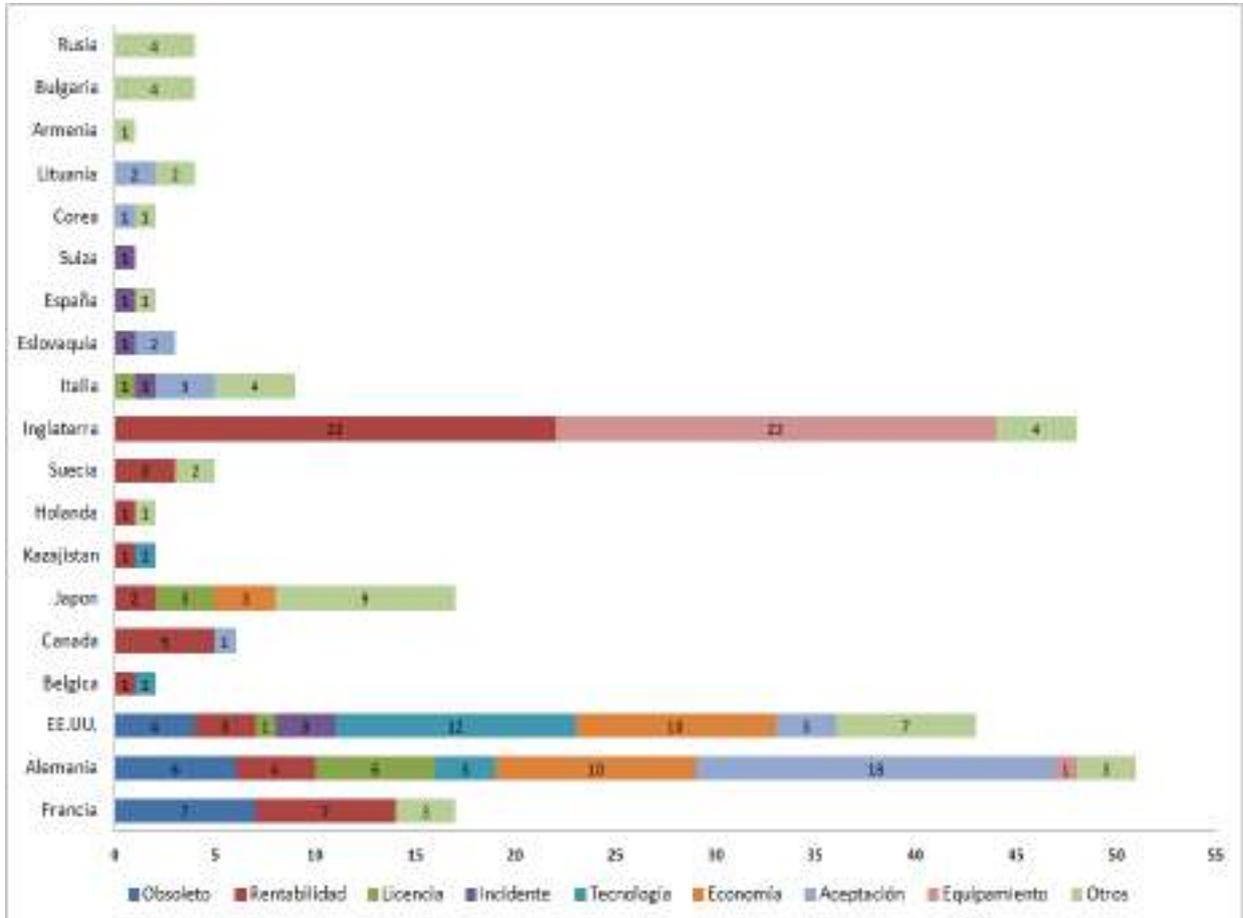


Gráfico N° 15: Salidas de servicio según motivos estipulados por país [Elaboración propia]

2.3.4. Resumen

A modo de resumen se incluye un gráfico de barras en el cual se presenta la cantidad de centrales nucleares en operación, la cantidad de centrales en construcción y la cantidad de unidades retiradas de servicio, por país.

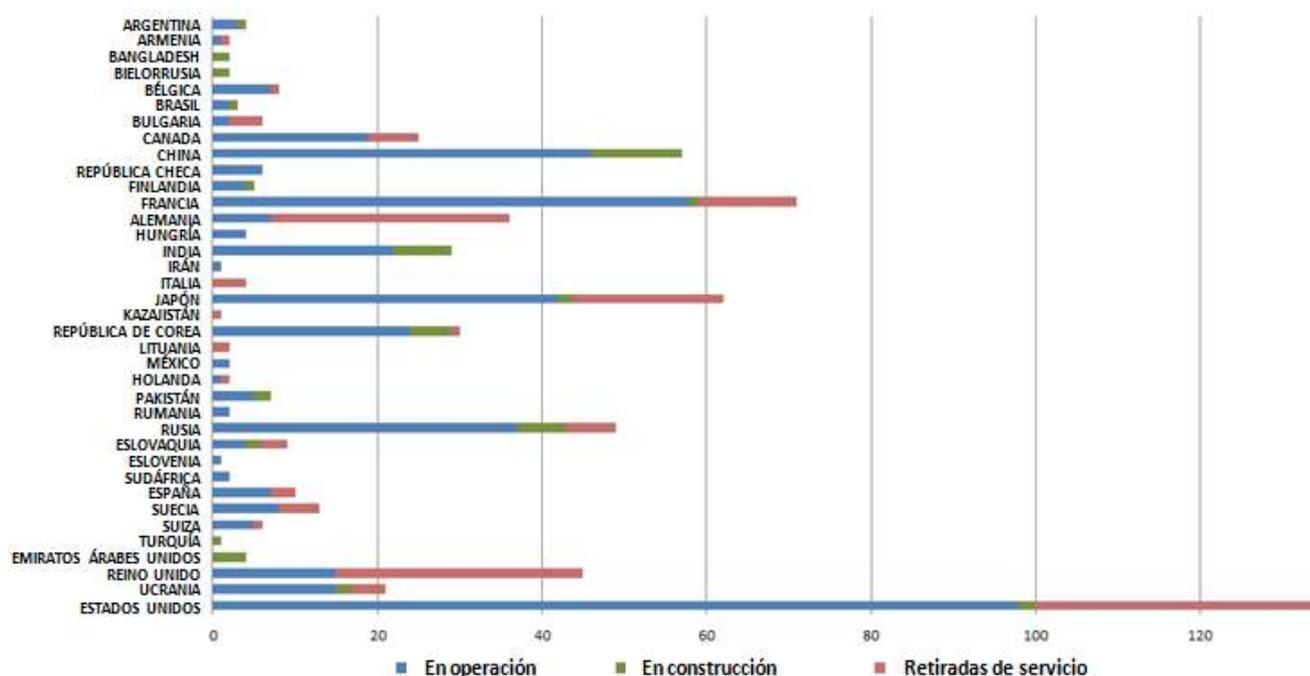


Gráfico N° 16: Centrales nucleares por país con su correspondiente estado [PRIS-IAEA]

3. ENERGÍA NUCLEAR EN EL MUNDO

El futuro de la energía nuclear en el mundo se encuentra transitando una etapa de incertidumbre, de la cual surgen puntos de vista encontrados entre los gobiernos de los diferentes países y la opinión pública de los mismos.

A este hecho se destaca el crecimiento exponencial de las energías renovables en el mundo y la creencia popular de que las mismas podrán reemplazar todas las fuentes de generación de energía eléctrica.

Por tal motivo y sumado a la ocurrencia del accidente de Fukushima en 2011, ciertos países se están replanteando su continuidad en la generación nuclear, principalmente en Europa. En contraparte, los países del continente asiático están apostando fuertemente a su crecimiento mediante la construcción de 42 centrales de energía nuclear.

Dada la incertidumbre respecto al futuro de la energía nuclear en el mundo, en el presente capítulo se abordará la situación de todos los países que actualmente cuentan con centrales nucleares y de los países que aún no la poseen, pero que planean incorporarla a sus matrices energéticas en el corto plazo. [8]; [9]; [10]; [11]

Se realizará una proyección de la potencia instalada nuclear por país según el continente de origen, desde el año 2019 (actual) hasta el año 2030.

Para abordar la proyección de la potencia instalada nuclear se harán dos estimaciones: una de mínima y una de máxima (considerando las centrales nucleares que saldrán de servicio y las que entrarán en servicio en ese período).

Como resultado se presentará una gráfica por país con la mínima y la máxima potencia instalada proyectada hasta el año 2030. Posteriormente se realizará una proyección de iguales características por continente y finalmente una proyección de la potencia instalada nuclear mundial.

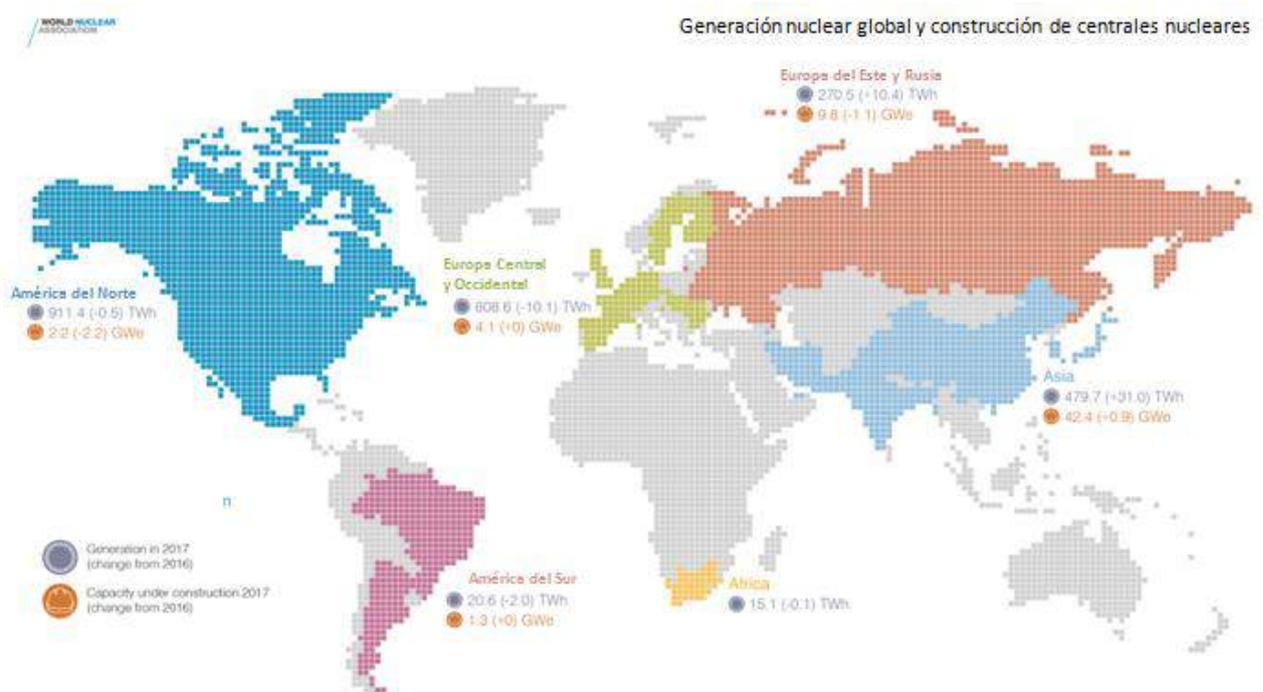


Figura N°4: Generación nuclear suministrada y potencia nuclear en construcción en el año 2017

3.1. América

3.1.1. Argentina



Argentina es considerada un país en expansión en términos de su capacidad en los usos pacíficos de la energía nuclear.

Actualmente el país dispone de tres centrales nucleares operativas: Atucha I con 362 MWe, Atucha II con 745 MWe y Embalse con 683 MWe, cuyo proyecto de extensión de vida acaba de ser finalizado, obteniendo un 6% de aumento de potencia y una vida útil extendida por 30 años más de operación.

Argentina está en proceso de construcción de un reactor prototipo modular denominado CAREM 25, con diseño propio y una capacidad proyectada de 32 MWe, convirtiéndose en el primer país del mundo en comenzar la construcción de éste tipo de reactores.

Argentina también se encuentra en proceso de negociación con la República Popular China a través de la Corporación Nuclear Nacional de China para la construcción de futuras centrales nucleares en el país.

● ESTADO ACTUAL

| ENERGÍA NUCLEAR DE ARGENTINA | | | |
|------------------------------|---------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| Participación | Reactores operativos | Reactores fuera de servicio | Reactores en construcción |
| | 3 | 0 | 1 |
| | Potencia instalada | Potencia retirada | Potencia a instalar |
| | 1790 MWe | 0 MWe | 32 MWe |

● FUTURO PROYECTADO

En el año 2015 la Argentina firmó un acuerdo con China para la construcción de dos nuevos Reactores Nucleares (proyecto de IV y V Central Nuclear), cuyo inicio de construcción de una de ellas estaba previsto para inicios del año 2016. A pesar de esto, el actual Gobierno Argentino ha decidido cancelar la construcción de la IV Central Nuclear y postergar el proyecto de la V Central Nuclear para el año 2022. A su vez continúa la

construcción del reactor prototipo CAREM 25, de diseño 100% nacional y con perspectivas de exportación.

● PROYECCIÓN DE POTENCIA INSTALADA NUCLEAR

Argentina cuenta con tres reactores nucleares en operación con una potencia instalada total de 1790 MW. Uno de ellos, Atucha I, finalizará su vida útil en el año 2024. Aún no está definido si se realizará una extensión de vida. Respecto al reactor actualmente en construcción, reactor CAREM, se proyecta una puesta en marcha del mismo para el año 2022, aportando 32 MWe. Argentina comenzará la construcción de una nueva central nuclear (Atucha III) en el año 2022 con una potencia de 1170 MWe. Se estima la finalización de la obra y conexión a la red para el año 2028.

Proyección de mínima potencia instalada:

- La Central Atucha I será retirada de servicio en el año 2024.

Proyección de máxima potencia instalada:

- La Central Atucha I tendrá una extensión de vida, por lo que no se la retirará de servicio en el período analizado.

➤ GRÁFICA DE PROYECCIÓN DE POTENCIA INSTALADA DESDE EL AÑO 2019 HASTA EL AÑO 2030



Gráfico N° 17: Proyección de potencia instalada nuclear en Argentina

3.1.2. Brasil



Brasil es considerado un país en expansión en términos de su capacidad en los usos pacíficos de la energía nuclear.

Actualmente opera dos centrales nucleares: Angra I con 640 MWe y Angra II con 1350 MWe.

Ambas centrales tienen una participación del 3% sobre la capacidad total de generación de energía del país.

Brasil se encuentra en construcción una nueva central nuclear, Angra III, con una potencia proyectada de 1405 MWe.

● ESTADO ACTUAL

| ENERGÍA NUCLEAR DE BRASIL | | | |
|---------------------------|----------------------|-----------------------------|---------------------------|
| Participación | Reactores operativos | Reactores fuera de servicio | Reactores en construcción |
| | 2 | 0 | 1 |
| | Potencia instalada | Potencia retirada | Potencia a instalar |
| | 1990 MWe | 0 MWe | 1405 MWe |

● FUTURO PROYECTADO

Electronuclear, la empresa brasilera encargada de construir y operar las centrales nucleares, ha propuesto desarrollar dos nuevos complejos nucleares con cuatro unidades cada uno y con potencias aproximadas de 6600 MWe y 5000 MWe respectivamente. En enero de 2016, Electronuclear llevó a representantes de China National Nuclear Corporation (CNNC) a Sergipe, al norte de la costa del estado de Bahía, para observar un sitio potencial.

Si bien la planificación de la construcción de estos complejos nucleares es un hecho concreto, es probable que la financiación no esté aún resuelta. En mayo de 2012, el gobierno anunció que la construcción de nuevas plantas no comenzaría hasta después de 2020.

Rosatom ofreció considerar un proyecto de construcción propia (BOO), como en Turquía, y en julio de 2014, Rusatom Overseas y Camargo Correa firmaron un contrato-acuerdo para la construcción de una serie de instalaciones en el sitio de la actual planta de energía nuclear de Angra, y posiblemente un acuerdo de cooperación en la construcción de centrales nucleares en nuevos sitios de Brasil.

En junio de 2015 Westinghouse firmó un acuerdo con la subsidiaria de CNEN, Nuclebras Equipamentos Pesados (NUCLEP), para colaborar en la fabricación de los componentes del reactor AP1000 en Brasil. KEPCO de República de Corea está ofreciendo su APR1400.

● PROYECCIÓN DE POTENCIA INSTALADA NUCLEAR

Actualmente Brasil opera dos centrales nucleares y no está planificado retirar de servicio ninguna de las unidades antes el año 2030.

Respecto a la central en construcción, Angra III, se estima que comenzará a entregar energía a la red en el año 2026.

Como situación de mínima se considerará que la central Angra III no se pondrá en servicio comercial antes del año 2030.

➤ GRÁFICA DE PROYECCIÓN DE POTENCIA INSTALADA DESDE EL AÑO 2019 HASTA EL AÑO 2030

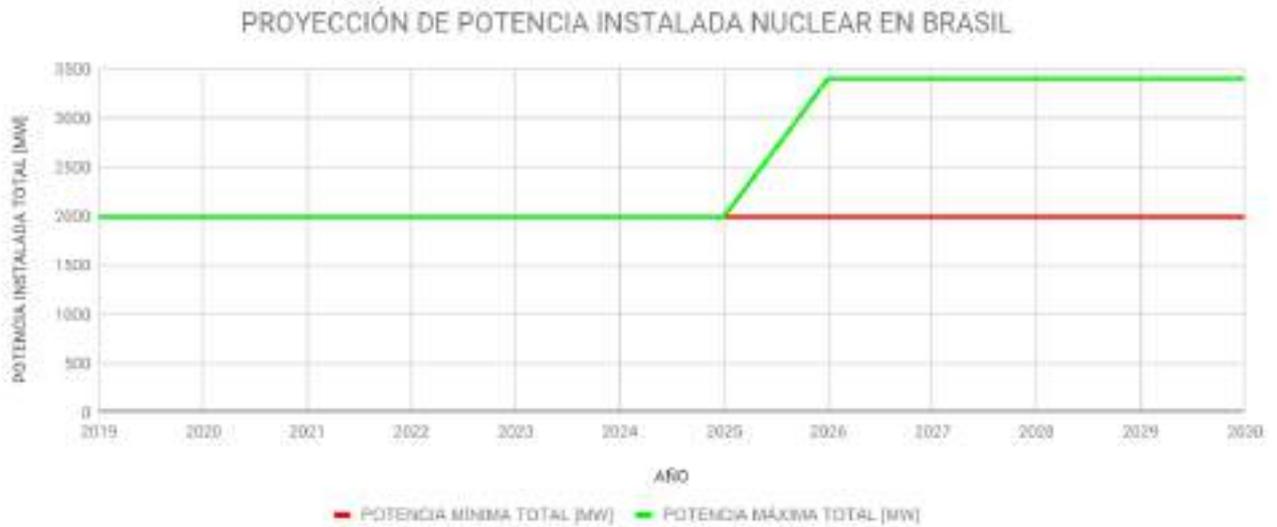


Gráfico N° 18: Proyección de potencia instalada nuclear en Brasil

3.1.3. México



En 1976, se inició la construcción del complejo nuclear Laguna Verde, que comprende dos reactores de 654 MWe netos cada uno. La primera unidad entró en operación comercial en julio de 1990 y la segunda en abril de 1995. En la actualidad estas dos unidades continúan operativas y generan el 5% del total del país.

● ESTADO ACTUAL

| ENERGÍA NUCLEAR DE MÉXICO | | | |
|---|----------------------|-----------------------------|---------------------------|
| Participación | Reactores operativos | Reactores fuera de servicio | Reactores en construcción |
| <p>■ No Nuclear ■ Nuclear</p> <p>95% 5%</p> | 2 | 0 | 0 |
| | Potencia instalada | Potencia retirada | Potencia a instalar |
| | 1615 MWe | 0 MWe | 0 MWe |

● FUTURO PROYECTADO

El programa del sector energético de México 2013-2018, propone el desarrollo de la infraestructura eléctrica, el aumento de la participación de la energía nuclear y la inclusión de medidas para incentivar el desarrollo de recursos humanos, fortalecer las capacidades industriales y tecnológicas nacionales existentes en el campo nuclear y para empoderar el organismo regulador (SENER, 2013).

Se están realizando estudios y análisis de prefactibilidad sobre la posibilidad de aumentar la flota nuclear.

PRODESEN (Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional) demostró que se podrían incorporar tres centrales nucleares de 1360 MWe en 2029, 2030 y 2031, respectivamente.

Entre las presentaciones de diferentes proveedores de tecnología de energía nuclear, General Electric-Hitachi promovió diferentes tipos de reactores para incorporar al complejo Laguna Verde, como los reactores avanzados de agua en ebullición y los reactores económicos de agua en ebullición simplificada.

● PROYECCIÓN DE POTENCIA INSTALADA NUCLEAR

No está previsto retirar de servicio las centrales nucleares operativas ni se cuenta con una planificación concreta de ampliación de la potencia instalada nuclear hasta el año 2030.

➤ GRÁFICA DE PROYECCIÓN DE POTENCIA INSTALADA DESDE EL AÑO 2019 HASTA EL AÑO 2030

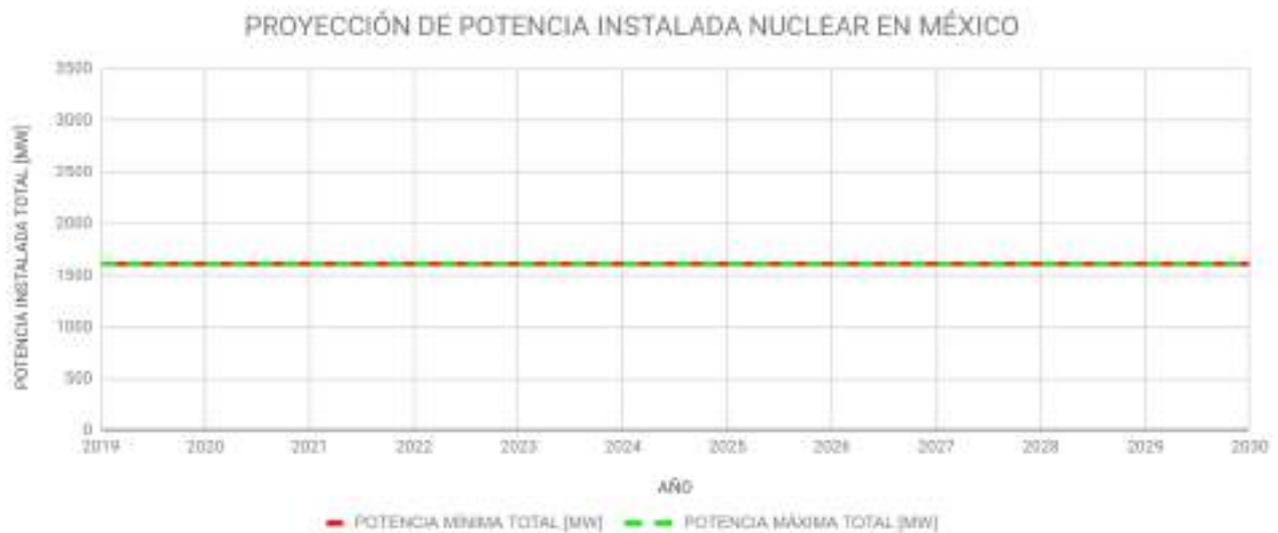


Gráfico N° 19: Proyección de potencia instalada nuclear en México

3.1.4. Estados Unidos

La energía nuclear de los Estados Unidos es la más grande del mundo, con 98 reactores nucleares comerciales. La potencia instalada total es de más de 100.000 MWe. La mayoría de las instalaciones nucleares están ubicadas en la parte central y occidental de los EE.UU.

En 2018, las plantas de energía nuclear produjeron 4.177.810 GWh de electricidad, lo que representa cerca del 20% del total de la generación eléctrica del país. El factor de carga ponderado promedio de 2018 para la flota nuclear de EE.UU. fue del 92% en comparación con el 75% para el resto de las centrales nucleares del mundo.

La industria nuclear estadounidense invierte cerca de 7.5 mil millones de dólares por año en mantenimiento y actualizaciones de las plantas. Los costos medios de generación nuclear en EE.UU. han bajado de US\$ 40/MWh en 2012 a US\$ 34/MWh en 2018.

millones con Georgia Power Company y Oglethorpe Power Corporation para la construcción y operación de dos reactores en Vogtle.

A principios de 2018, el plazo para los créditos fiscales a la producción para las plantas de energía nuclear avanzadas se extendió en virtud de un proyecto de ley de presupuesto aprobado por el Senado de los Estados Unidos y la Cámara de Representantes. La nueva ley permite que los reactores que entren en servicio después del 31 de diciembre de 2020 califiquen para los créditos fiscales (en este momento no hay una provisión establecida para los créditos), y permite que el Secretario de Energía de EE.UU. asigne créditos de hasta 6.000 MWe para la nueva capacidad nuclear que entre en servicio después del 1 de enero de 2021. La extensión significa que las dos unidades Vogtle en construcción serán elegibles para los créditos fiscales.

Por otro lado, el DOE promueve la energía nuclear como un recurso capaz de satisfacer las necesidades energéticas, ambientales y de seguridad nacional. Para lograr su misión, la Oficina de Energía Nuclear está persiguiendo principalmente tres objetivos:

- Desarrollar las bases científicas para extender la vida operativa de las centrales nucleares existentes más allá del actual período de licencia de 60 años (es decir, la licencia inicial de 40 años y una primera renovación de licencia de 20 años) y garantizar la productividad, seguridad y protección de plantas operativas a largo plazo.
- Desarrollar tecnologías de reactores de potencia avanzados y reactores modulares avanzados (SMR, por sus siglas en inglés) para promover avances en seguridad, técnicos, económicos y ambientales en materia de energía nuclear.
- Desarrollar tecnologías de ciclo de combustible sostenibles y opciones para mejorar la utilización de recursos para mejorar la seguridad y limitar el riesgo de proliferación.

● PROYECCIÓN DE POTENCIA INSTALADA NUCLEAR

Estados Unidos cuenta en la actualidad con 98 centrales nucleares operativas y dos unidades en construcción, iniciadas en marzo del 2013 (VOGTLE-3) y noviembre del 2013 (VOGTLE-4).

El gobierno de los Estados Unidos no ha declarado específicamente cuáles son sus perspectivas respecto a las centrales que actualmente están operando, ni ha confirmado el comienzo de construcción de nuevas centrales nucleares. Por tal motivo, para realizar la proyección de la potencia instalada nuclear al año 2030 se realizaron los siguientes supuestos:

Proyección de mínima potencia instalada:

- La central actualmente en construcción VOGTLE-3 se conectará a la red en el año 2022.
- La central actualmente en construcción VOGTLE-4 se conectará a la red en el año 2023.
- Las centrales operativas se sacarán de servicio a medida que cumplan los 50 años de operación.

Proyección de máxima potencia instalada:

- La central actualmente en construcción VOGTLE-3 se conectará a la red en el año 2020.
- La central actualmente en construcción VOGTLE-4 se conectará a la red en el año 2021.
- Las centrales operativas se sacarán de servicio a medida que cumplan los 60 años de operación.

➤ GRÁFICA DE PROYECCIÓN DE POTENCIA INSTALADA DESDE EL AÑO 2019 HASTA EL AÑO 2030

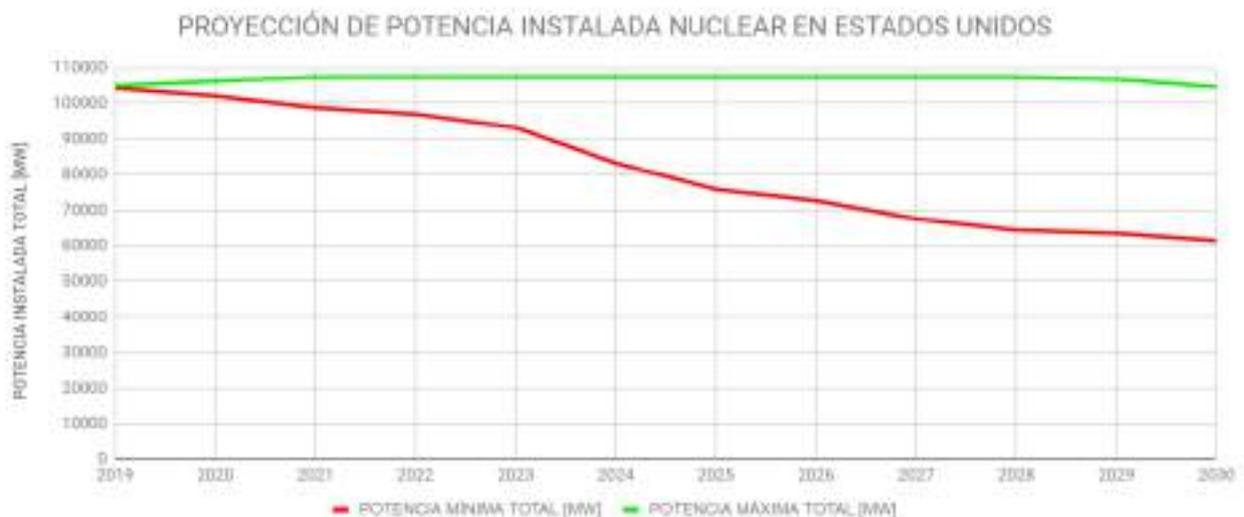


Gráfico N° 20: Proyección de potencia instalada nuclear en Estados Unidos

3.1.5. Canadá

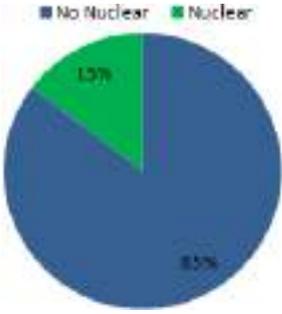
Canadá fue un líder mundial en energía nuclear desde el desarrollo de la tecnología del reactor CANDU en 1952. A la fecha la energía nuclear en Canadá es la segunda fuente más grande de electricidad no emisora de gases de efecto invernadero, con 19 reactores nucleares, los cuales producen aproximadamente el 15% del suministro eléctrico total del país. Canadá es también el segundo productor mundial de uranio, con más del 20% de la producción mundial. El ochenta y cinco por ciento de la producción de uranio de Canadá se exporta para su uso en energía nuclear en todo el mundo.

Los reactores nucleares contribuyen con US\$ 6,6 mil millones por año al PIB, crean US\$ 1,5 mil millones en ingresos del gobierno y generan alrededor de US\$ 1,2 mil millones en exportaciones.

La industria de la energía nuclear Canadiense genera 21.000 puestos de trabajo permanentes, 10.000 puestos como contratistas y es responsable de otros 40.000 empleos indirectamente. El gobierno invirtió alrededor de US\$ 13.26 mil millones en el programa nuclear durante 1952-2006 a través de AECL (Atomic Energy of Canada Limited). De acuerdo con la AECL, esta inversión ha generado más de US\$ 160 mil millones en beneficios del PIB para Canadá a partir de la producción de energía, la investigación y desarrollo, las exportaciones de reactores CANDU, la exportación de uranio, la exportación de radioisótopos para medicina nuclear y los servicios profesionales.



● ESTADO ACTUAL

| ENERGÍA NUCLEAR DE CANADÁ | | | |
|---|----------------------|-----------------------------|---------------------------|
| Participación | Reactores operativos | Reactores fuera de servicio | Reactores en construcción |
|  | 19 | 6 | 0 |
| | Potencia instalada | Potencia retirada | Potencia a instalar |
| | 14512 MWe | 2268 MWe | 0 MWe |

● FUTURO PROYECTADO

Canadá reconoce que la energía nuclear puede desempeñar un papel importante en el logro de la seguridad energética mundial, la mitigación del cambio climático y los objetivos de desarrollo sostenible.

El Plan de Energía a Largo Plazo 2013 de Ontario se compromete a mantener la energía nuclear en aproximadamente el 50% del suministro de electricidad de la provincia, mientras que el Plan energético de Nueva Brunswick sostiene que la energía nuclear continúe contribuyendo con el 35%.

En diciembre de 2015, la provincia de Ontario anunció que había firmado un acuerdo enmendado con el operador de la Central Bruce Power, el cual le permitirá restaurar seis unidades nucleares en su Estación de Generación Nuclear, entre los años 2020 y 2036.

En enero de 2016, Ontario aprobó la renovación de cuatro reactores nucleares en la estación de generación nuclear de Darlington y aprobó una propuesta para operar unidades en la estación de generación nuclear de Pickering por un período de dos a cuatro años adicionales más allá de la clausura programada de la planta en 2020. Se espera que la remodelación de Darlington esté terminada para 2026.

● PROYECCIÓN DE POTENCIA INSTALADA NUCLEAR

Canadá cuenta en la actualidad con 19 centrales nucleares operativas y no posee unidades en construcción.

Las estimaciones de mínima y máxima potencia se realizarán de acuerdo a las declaraciones del gobierno de Canadá respecto a la extensión de operación de las centrales operativas más antiguas, como se muestra a continuación:

- A la central BRUCE se le extenderá la vida como mínimo hasta el año 2036.
- A la central DARLINGTON se le realizará una extensión de vida por un nuevo ciclo operativo.
- PICKERING 1-4 se operarán hasta el año 2022 (situación de mínima)
- PICKERING 1-4 se operarán hasta el año 2024 (situación de máxima).
- El resto de las centrales operarán sin problemas, pasado el año 2030.

➤ GRÁFICA DE PROYECCIÓN DE POTENCIA INSTALADA DESDE EL AÑO 2019 HASTA EL AÑO 2030

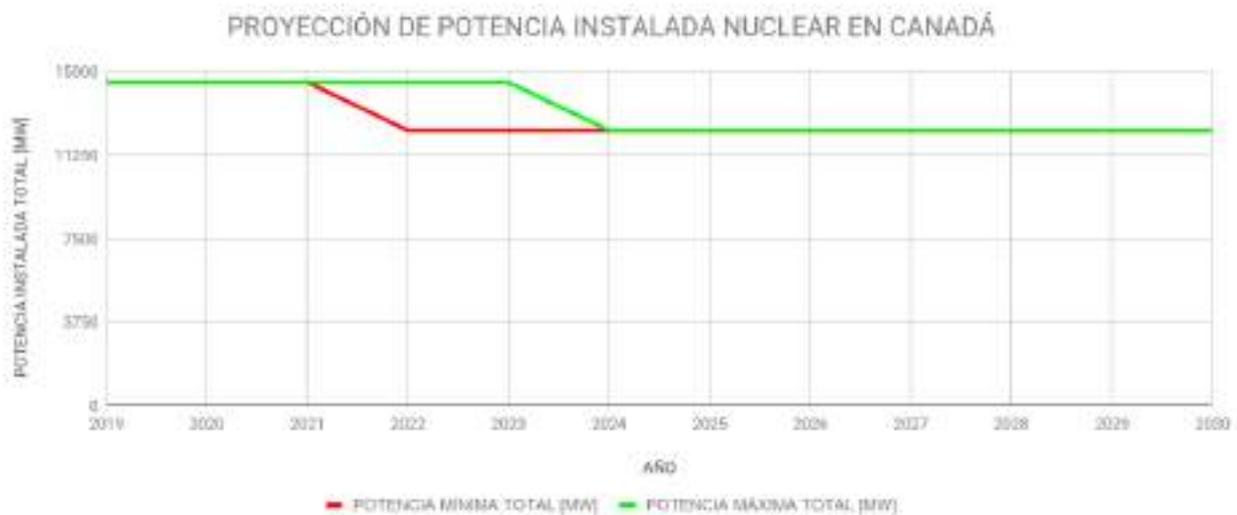


Gráfico N° 21: Proyección de potencia instalada nuclear en Canadá

3.2. Europa

3.2.1. Bélgica



El desarrollo de la energía nuclear en Bélgica comenzó tras la finalización de la Segunda Guerra Mundial, cuando Bélgica firmó un acuerdo de cooperación técnica nuclear con los Estados Unidos de América.

Bélgica fue pionera en la adopción de tecnología nuclear con fines pacíficos a principios de los años sesenta. Durante muchos años, la industria nuclear belga cubrió casi todas las actividades en el ciclo del combustible nuclear.

- ESTADO ACTUAL

| ENERGÍA NUCLEAR DE BÉLGICA | | | |
|----------------------------|----------------------|-----------------------------|---------------------------|
| Participación | Reactores operativos | Reactores fuera de servicio | Reactores en construcción |
| | 7 | 1 | 0 |
| | Potencia instalada | Potencia retirada | Potencia a instalar |
| | 9207 MWe | 12 MWe | 0 MWe |

● FUTURO PROYECTADO

La Ley de 31 de enero de 2003 sobre la energía nuclear establece la eliminación progresiva de la energía nuclear, limitando el funcionamiento de los reactores existentes a un máximo 40 años y prohibiendo la construcción de nuevas centrales nucleares en Bélgica.

Posteriormente, los gobiernos sucesivos han modificado esta ley para garantizar la seguridad del suministro de electricidad, lo que permite extender la operación de las unidades Tihange 1 y Doel 1 y 2; sin embargo la ley continúa firme con la decisión de eliminar todos los reactores de energía nuclear para el año 2025.

Un informe publicado en octubre de 2016 por PwC Enterprise Advisory, en el cual se consideran escenarios energéticos para 2050, mostró que Bélgica no podría cumplir sus objetivos climáticos al tiempo que lograría la estabilidad del precio de la electricidad a largo plazo y la seguridad del suministro sin una contribución significativa de la energía nuclear más allá de 2025.

● PROYECCIÓN DE POTENCIA INSTALADA NUCLEAR

Proyección de mínima potencia instalada:

- La central Doel 1 será sacada de servicio en el año 2019.
- La central Tihange 1 será sacada de servicio en el año 2020.
- La central Doel 2 será sacada de servicio en el año 2021.
- El resto de las centrales se retirarán de servicio a medida que cumplan 40 años de vida útil.

Proyección de máxima potencia instalada:

Debido a la demora en la planificación del cumplimiento de los objetivos estipulados por la ley, como situación de máxima se estima que las centrales operativas serán retiradas de servicio a medida que alcancen los 50 años de vida útil.

➤ GRÁFICA DE PROYECCIÓN DE POTENCIA INSTALADA DESDE EL AÑO 2019 HASTA EL AÑO 2030

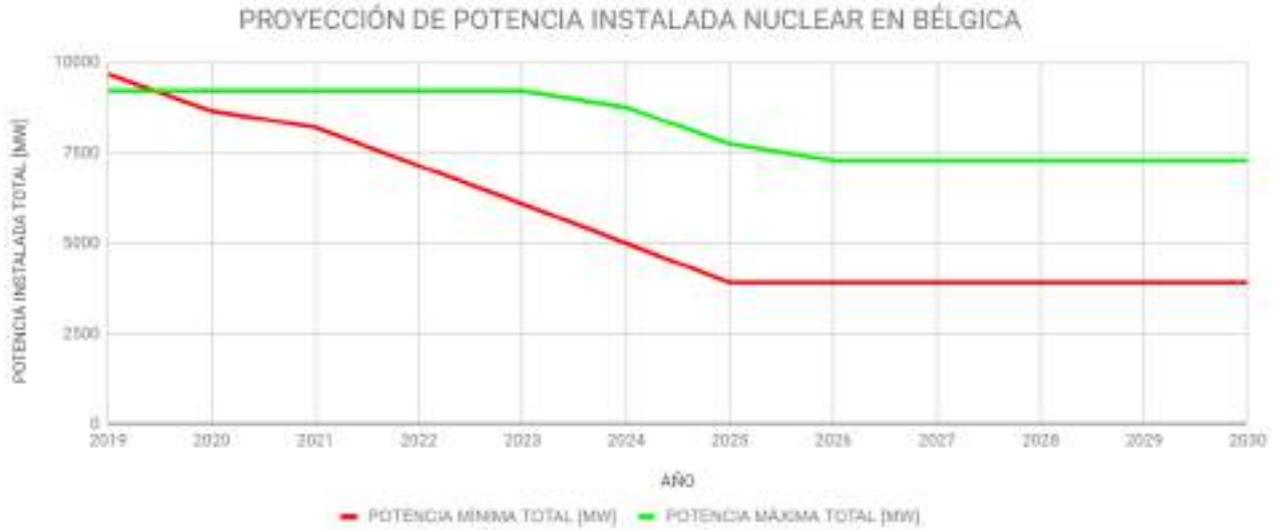
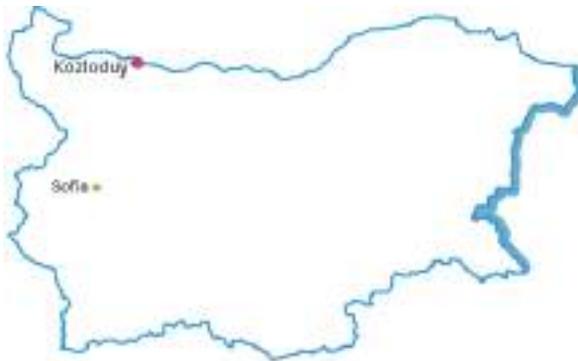


Gráfico N° 22: Proyección de potencia instalada nuclear en Bélgica

3.2.2. Bulgaria



El programa de energía nuclear búlgaro se lanzó en el año 1974 con la puesta en marcha de la primera unidad de energía nuclear, dentro del complejo Kozloduy, donde se construyeron en total seis unidades: las unidades 5 y 6 continúan operativas y las unidades 1 a 4 están en proceso de desmantelamiento.

● ESTADO ACTUAL

| ENERGÍA NUCLEAR DE BULGARIA | | | |
|--|----------------------|-----------------------------|---------------------------|
| Participación | Reactores operativos | Reactores fuera de servicio | Reactores en construcción |
| <p>■ No Nuclear ■ Nuclear</p> <p>34% 66%</p> | 2 | 4 | 0 |
| | Potencia instalada | Potencia retirada | Potencia a instalar |
| | 2000 MWe | 1760 MWe | 0 MWe |

● FUTURO PROYECTADO

De acuerdo con la Decisión del Consejo de Ministros adoptada en principio en 2012, Bulgaria prevé la construcción de un nuevo reactor a localizar en el sitio de la central nuclear Kozloduy basado en la tecnología más reciente de generación III o III+ (PWR). La implementación del proyecto debe basarse en la participación estratégica de los inversores de conformidad con las Normas de ayudas estatales de la Comisión Europea y sin préstamos estatales.

● PROYECCIÓN DE POTENCIA INSTALADA NUCLEAR

Bulgaria cuenta con dos centrales nucleares en operación, KOZLODUY-5 y KOZLODUY-6, con una potencia instalada total de 2000 MW.

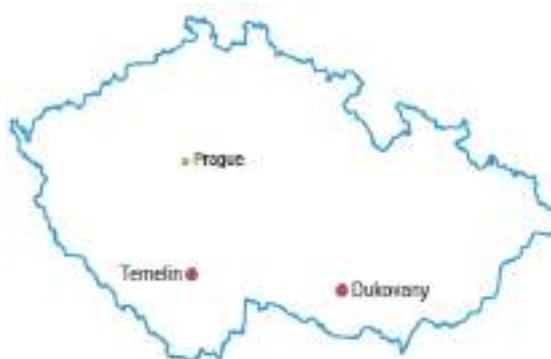
No está previsto retirar de servicio las centrales nucleares ni se cuenta con una planificación concreta de ampliación de la potencia instalada nuclear hasta el año 2030.

➤ GRÁFICA DE PROYECCIÓN DE POTENCIA INSTALADA DESDE EL AÑO 2019 HASTA EL AÑO 2030



Gráfico N° 23: Proyección de potencia instalada nuclear en Bulgaria

3.2.3. República checa



La Política Estatal de Energía actualizada de la República Checa considera que la energía nuclear es una opción viable y deseable.

República Checa cuenta en la actualidad con 6 centrales nucleares operativas las cuales abarcan aproximadamente el 34% de la generación total del país y se encuentra en la planificación de la construcción de nuevas unidades de generación nuclear.

● ESTADO ACTUAL

| ENERGÍA NUCLEAR DE REPÚBLICA CHECA | | | |
|--|----------------------|-----------------------------|---------------------------|
| Participación | Reactores operativos | Reactores fuera de servicio | Reactores en construcción |
| <p>■ No Nuclear ■ Nuclear</p> <p>34% 66%</p> | 6 | 0 | 0 |
| | Potencia instalada | Potencia retirada | Potencia a instalar |
| | 4160 MWe | 0 MWe | 0 MWe |

● FUTURO PROYECTADO

De acuerdo con la Política de Energía del Estado de la República Checa, los objetivos principales en relación a la energía nuclear incluyen:

- Apoyar el desarrollo de la energía nuclear y plantear un objetivo de participación nuclear del 50% de la matriz energética.
- Respaldar y acelerar el proceso de negociación, preparación e implementación de nuevas unidades nucleares en las plantas de energía nuclear existentes, con una producción total de hasta 2500 MW.
- Crear condiciones para extender la vida útil de la planta de Dukovany (de 50 a 60 años).

● PROYECCIÓN DE POTENCIA INSTALADA NUCLEAR

El gobierno checo no tiene previsto retirar de servicio las centrales nucleares operativas ni cuenta con una planificación concreta de incorporar a la red nuevas unidades hasta el año 2030.

➤ GRÁFICA DE PROYECCIÓN DE POTENCIA INSTALADA DESDE EL AÑO 2019 HASTA EL AÑO 2030



Gráfico N° 24: Proyección de potencia instalada nuclear en República Checa

3.2.4. Finlandia



Finlandia cuenta con cuatro centrales nucleares en operación con una participación del 33% respecto de la generación total del país.

El gobierno finlandés se encuentra en la planificación de la expansión de los programas existentes, dado que están construyendo una central nuclear con una capacidad proyectada de 1650 MWe y se planea construir otra con una capacidad esperada de 1200 MW.

Uno de los principales proyectos nucleares en Finlandia es el depósito subterráneo de combustible gastado, Onkalo, que se está construyendo en el sitio de Olkiluoto y es el más avanzado del mundo en cuanto al avance de ejecución de la obra.

● ESTADO ACTUAL

| ENERGÍA NUCLEAR DE FINLANDIA | | | |
|--|----------------------|-----------------------------|---------------------------|
| Participación | Reactores operativos | Reactores fuera de servicio | Reactores en construcción |
| <p>■ No Nuclear ■ Nuclear</p> <p>33% 67%</p> | 4 | 0 | 1 |
| | Potencia instalada | Potencia retirada | Potencia a instalar |
| | 2892 MWe | 0 MWe | 1720 MWe |

● FUTURO PROYECTADO

El 6 de mayo de 2010, el gobierno finlandés elevó al parlamento la propuesta de construcción de dos centrales nucleares adicionales. La solicitud de TVO (empresa constructora y operadora nuclear de Finlandia) para construir una nueva unidad, Olkiluoto 4, fue aprobada; pero posteriormente el proyecto fue cancelado.

La unidad en construcción Olkiluoto-3 tiene fecha estimada de finalización para enero de 2020, mientras que la central planificada Hanhikivi 1, tiene una fecha estimada de inicio de obra para el año 2021 y una finalización de la misma proyectada para el año 2028.

● PROYECCIÓN DE POTENCIA INSTALADA NUCLEAR

Proyección de mínima potencia instalada:

Para la proyección se suponen dos años de demora en la conexión a la red tanto de la central en construcción OLKILUOTO-3 como en la central planificada HANHIKIVI-1. Respecto a las centrales actualmente operativas, se proyecta su cierre al cumplir los 50 años de vida útil.

- La central OLKILUOTO-3 será conectada a la red en el año 2022.
- La central HANHIKIVI-1 será conectada a la red en el año 2030.
- La central LOVIISA-1 será retirada de servicio en el año 2027.
- Las centrales OLKILUOTO 1/2 serán retiradas de servicio en el año 2028 y 2029 respectivamente.
- La central LOVIISA-1 será retirada de servicio en el año 2030.

Proyección de máxima potencia instalada:

La proyección de incorporación de las centrales OLKILUOTO-3 y HANHIKIVI-1 se realiza de acuerdo a la planificación del gobierno finlandés. Respecto a las centrales operativas, se considera una extensión de vida de las mismas por encima de los 50 años de vida útil.

- La central OLKILUOTO-3 será conectada a la red en el año 2020.
- La central HANHIKIVI-1 será conectada a la red en el año 2028.

➤ GRÁFICA DE PROYECCIÓN DE POTENCIA INSTALADA DESDE EL AÑO 2019 HASTA EL AÑO 2030



Gráfico N° 25: Proyección de potencia instalada nuclear en Finlandia

3.2.5. Francia

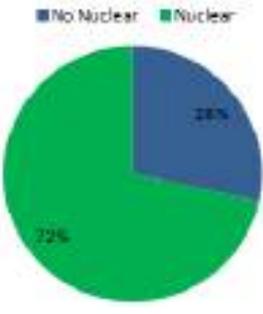


Francia tiene 58 reactores nucleares en operación (34 reactores de 950 MWe, 20 reactores de 1400 MWe y 4 reactores de 1550 MWe) y un reactor EPR en construcción en el sitio de Flamanville, con una potencia proyectada de 1650 MWe.

Las centrales nucleares en Francia representan más del 70% del total de la generación eléctrica, característica que lo posiciona como el país con mayor participación nuclear del mundo en su matriz energética y el segundo país con mayor cantidad de centrales nucleares operativas.

La tasa de disponibilidad promedio de las centrales nucleares francesas es del 80%.

● ESTADO ACTUAL

| ENERGÍA NUCLEAR DE FRANCIA | | | |
|---|----------------------|-----------------------------|---------------------------|
| Participación | Reactores operativos | Reactores fuera de servicio | Reactores en construcción |
|  | 58 | 12 | 1 |
| | Potencia instalada | Potencia retirada | Potencia a instalar |
| | 65880 MWe | 4240 MWe | 1650 MWe |

● FUTURO PROYECTADO

La estrategia de desarrollo nuclear está relacionada con los objetivos establecidos por la Ley de Transición de la Energía para el Crecimiento Verde, que se encuentra en revisión. La mayoría de los 58 reactores nucleares alcanzarán los 40 años de operación en los próximos 15 años. Luego, cada reactor deberá aprobar una evaluación de seguridad periódica y exhaustiva (que se debe realizar cada 10 años de operación) para ser autorizado a extender sus actividades de generación de energía.

Dada la ambición de reducir la participación de la energía nuclear en la matriz energética, la pregunta sobre la extensión del funcionamiento de algunas de las centrales nucleares aún es incierta.

Además, la estrategia nuclear dependerá en gran medida de la evolución del consumo de electricidad, el desarrollo de las energías renovables y el nivel de las exportaciones de electricidad.

● PROYECCIÓN DE POTENCIA INSTALADA NUCLEAR

Proyección de mínima potencia instalada:

- La central en construcción FLAMANVILLE-3 será conectada a la red en el año 2022.
- Las centrales actualmente operativas se retirarán de servicio a medida que cumplan los 45 años de operación.

Proyección de máxima potencia instalada:

- La central en construcción FLAMANVILLE-3 será conectada a la red en el año 2020.
- Las centrales actualmente operativas se retirarán de servicio a medida que cumplan los 50 años de operación.

➤ GRÁFICA DE PROYECCIÓN DE POTENCIA INSTALADA DESDE EL AÑO 2019 HASTA EL AÑO 2030

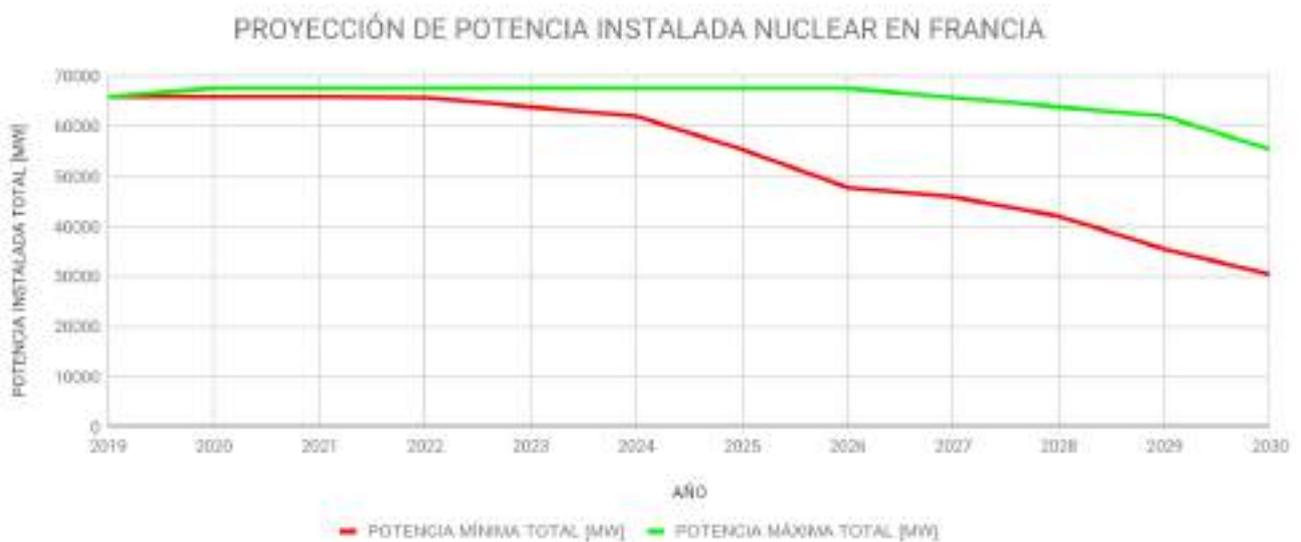


Gráfico N° 26: Proyección de potencia instalada nuclear en Francia

3.2.6. Alemania



Alemania a febrero de 2019 cuenta con siete reactores de energía nuclear en estado operativo, con una participación cercana al 12% respecto a la generación total del país.

El gobierno alemán ha decidido eliminar por completo el programa de energía nuclear y actualmente se encuentra en proceso de cierre progresivo de todas sus centrales nucleares, con objetivo de finalización para el año 2022.

Otras seis plantas de energía nuclear nunca comenzaron a operar, dado que los proyectos se abandonaron durante la fase de construcción.

Como se especifica en la Ley de Energía Atómica, no se construirán nuevas centrales nucleares para la producción comercial de electricidad.

● ESTADO ACTUAL

| ENERGÍA NUCLEAR DE ALEMANIA | | | |
|-----------------------------|---------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| Participación | Reactores operativos | Reactores fuera de servicio | Reactores en construcción |
| | 7 | 29 | 0 |
| | Potencia instalada | Potencia retirada | Potencia a instalar |
| | 10013 MWe | 17849 MWe | 0 MWe |

● FUTURO PROYECTADO

El gobierno alemán que asumió luego de las elecciones federales de 1998 tuvo como objetivo la eliminación gradual de la energía nuclear. Luego del cambio de gobierno en 2009, se canceló el programa de eliminación gradual de la energía nuclear.

Posteriormente en 2011 y a consecuencia del accidente ocurrido en la central de Fukushima, se cerraron de inmediato ocho reactores nucleares y se consideró nuevamente la eliminación total de la energía nuclear en Alemania.

Un total de 23 reactores se encuentran en proceso de desmantelamiento y tres unidades ya han sido completamente desmanteladas.

Los siete reactores de energía nuclear que aún continúan en funcionamiento se cerrarán permanentemente en forma gradual hacia fines de 2022.

● PROYECCIÓN DE POTENCIA INSTALADA NUCLEAR

El gobierno alemán está firme en la decisión de cerrar la totalidad de las plantas nucleares progresivamente con fecha límite en el año 2022. Dado que no ha especificado la cronología, se propone la siguiente:

- La central GROHNDE se retira de servicio en el año 2019
- La central GUNDREMMINGEN-C se retira de servicio en el año 2020
- La central PHILIPPSBURG-2 se retira de servicio en el año 2020
- La central BROKDORF se retira de servicio en el año 2021
- La central ISAR-2 se retira de servicio en el año 2021
- La central EMSLAND se retira de servicio en el año 2022
- La central NECKARWESTHEIM-2 se retira de servicio en el año 2022

➤ GRÁFICA DE PROYECCIÓN DE POTENCIA INSTALADA DESDE EL AÑO 2019 HASTA EL AÑO 2030



Gráfico N° 27: Proyección de potencia instalada nuclear en Alemania

3.2.7. Hungría



Hungría cuenta en la actualidad con un complejo nuclear integrado por cuatro reactores de generación, un reactor de investigación y un reactor de entrenamiento en funcionamiento. El gobierno húngaro planea la construcción de nuevas centrales nucleares con el fin de expandir el programa de energía nuclear y satisfacer la creciente demanda de electricidad.

● ESTADO ACTUAL

| ENERGÍA NUCLEAR DE HUNGRÍA | | | |
|-------------------------------|----------------------|-----------------------------|---------------------------|
| Participación | Reactores operativos | Reactores fuera de servicio | Reactores en construcción |
| <p>■ No Nuclear ■ Nuclear</p> | 4 | 0 | 0 |
| | Potencia instalada | Potencia retirada | Potencia a instalar |
| | 2000 MWe | 0 MWe | 0 MWe |

● FUTURO PROYECTADO

En el año 2011 el Parlamento húngaro aceptó la Estrategia Nacional de Energía 2030, que proyecta un escenario "nuclear-carbón-verde" y la preservación a largo plazo de la energía nuclear.

Según la Ley de Energía Atómica de Hungría, el gobierno debe obtener una decisión en principio del Parlamento para iniciar cualquier actividad preparatoria que pueda llevar a la construcción de una nueva instalación nuclear.

El 30 de marzo de 2009, los miembros del Parlamento húngaro dieron su decisión de principio con más del 90% de los votos a favor.

A raíz de esto se comenzó la preparación para la construcción de nuevas centrales nucleares. Las actividades incluyeron preparativos para la obtención de licencias ambientales y de sitio. También se inició una encuesta para determinar los posibles proveedores para la construcción de las nuevas unidades y la demanda de la mano de obra necesaria.

● PROYECCIÓN DE POTENCIA INSTALADA NUCLEAR

No está previsto retirar de servicio las centrales nucleares ni se cuenta con una planificación concreta de ampliación de la potencia instalada nuclear hasta el año 2030.

➤ GRÁFICA DE PROYECCIÓN DE POTENCIA INSTALADA DESDE EL AÑO 2019 HASTA EL AÑO 2030

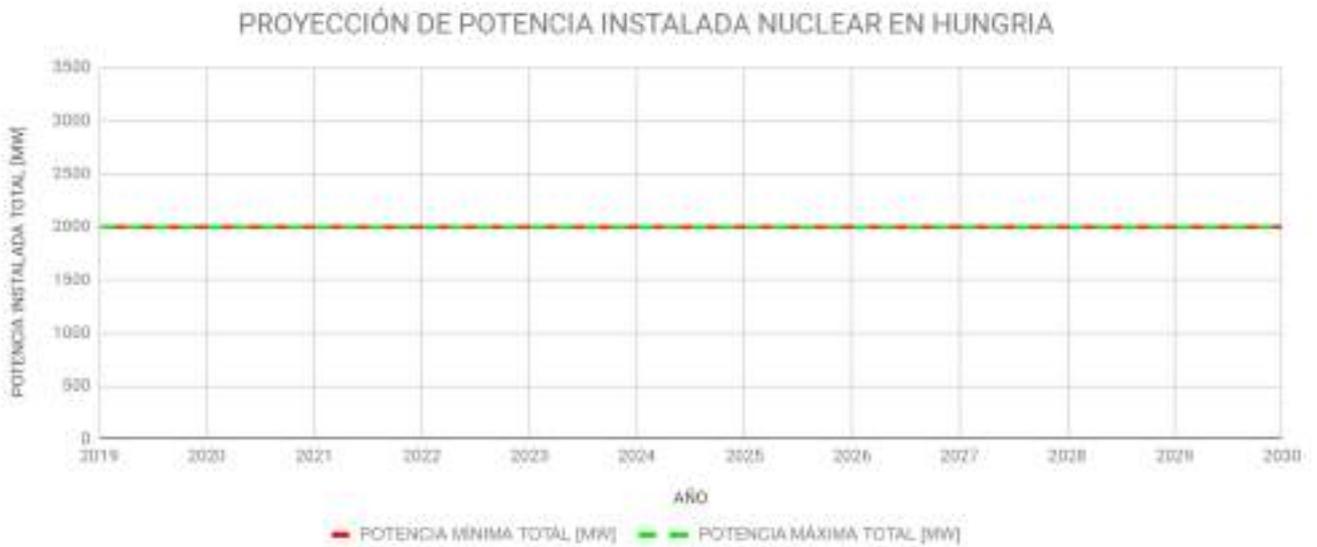


Gráfico N° 28: Proyección de potencia instalada nuclear en Hungría

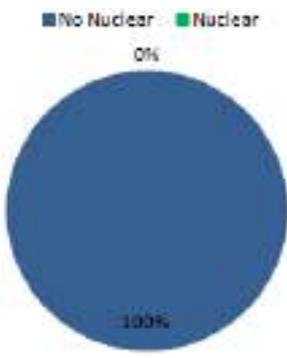
3.2.8. Italia



Italia inició su programa nuclear en la década de 1960 con la construcción de cuatro plantas de energía nuclear y algunas instalaciones de investigación del ciclo del combustible. En la década de 1980 se estaba construyendo una central nuclear adicional.

Sin embargo, tras el referéndum de 1987, que tuvo lugar después del accidente de Chernobyl, se tomó la decisión de detener el programa nuclear y de cerrar definitivamente las instalaciones operativas.

● ESTADO ACTUAL

| ENERGÍA NUCLEAR DE ITALIA | | | |
|---|----------------------|-----------------------------|---------------------------|
| Participación | Reactores operativos | Reactores fuera de servicio | Reactores en construcción |
|  <p>■ No Nuclear ■ Nuclear 0% 100%</p> | 0 | 4 | 0 |
| | Potencia instalada | Potencia retirada | Potencia a instalar |
| | 0 MWe | 1472 MWe | 0 MWe |

● FUTURO PROYECTADO

Como Italia no tiene reactores de energía nuclear en operación y no está planificando programas nucleares, sus actividades principales en el campo nuclear seguirán relacionadas con el desmantelamiento de instalaciones existentes, la operación de unos pocos reactores de investigación y las aplicaciones de la tecnología nuclear en medicina nuclear, industria e investigación.

● PROYECCIÓN DE POTENCIA INSTALADA NUCLEAR

No está previsto ni el corto ni el mediano plazo construir nuevas centrales nucleares de potencia en el país.

3.2.9. Lituania



Lituania tiene dos reactores de energía nuclear en proceso de desmantelamiento y varias instalaciones de gestión de combustible nuclear gastado y residuos radiactivos en construcción o en funcionamiento.

Se ha suspendido el desarrollo potencial de una nueva central nuclear de potencia, concretamente el proyecto de la central nuclear de Visaginas.

● **ESTADO ACTUAL**

| ENERGÍA NUCLEAR DE LITUANIA | | | |
|-----------------------------|----------------------|-----------------------------|---------------------------|
| Participación | Reactores operativos | Reactores fuera de servicio | Reactores en construcción |
| | 0 | 2 | 0 |
| | Potencia instalada | Potencia retirada | Potencia a instalar |
| | 0 MWe | 2600 MWe | 0 MWe |

● **FUTURO PROYECTADO**

A finales del año 2006 tres compañías energéticas de los Estados bálticos (Lietuvos Energija AB, Latvenergo AS y Eesti Energia AS) realizaron un estudio de viabilidad sobre la implementación de un nuevo proyecto de construcción de una central nuclear en Lituania. Llegaron a la conclusión de que el proyecto era viable y estaba fundamentado desde el punto de vista económico, técnico, ambiental y legal.

Posteriormente, el 24 de noviembre de 2016, el Ministerio de Energía aprobó las Directrices Clave Recomendadas de la Estrategia Nacional de Energía de Lituania, en las cuales se sugirió suspender el proyecto de construcción de la nueva central nuclear hasta que fuera rentable en relación con las condiciones del mercado, o necesario con respecto a la seguridad del suministro de energía.

● **PROYECCIÓN DE POTENCIA INSTALADA NUCLEAR**

No está previsto ni el corto ni el mediano plazo construir nuevas centrales nucleares de potencia en el país.

3.2.10. Holanda



Holanda tiene un sólo reactor nuclear en operación el cual tiene una participación de aproximadamente el 3% sobre la generación total del país.

Aunque se hicieron planes para expandir el parque nuclear en 3.000 MWe, estos planes se archivaron tras el accidente de Chernobyl en 1986.

Holanda es un país muy fuerte en la producción de radioisótopos para medicina nuclear. Mediante la operación de un sólo reactor de investigación, Holanda produce cerca del 60% de los radioisótopos que se utilizan en todo el continente Europeo.

● **ESTADO ACTUAL**

| ENERGÍA NUCLEAR DE HOLANDA | | | |
|----------------------------|----------------------|-----------------------------|---------------------------|
| Participación | Reactores operativos | Reactores fuera de servicio | Reactores en construcción |
| | 1 | 2 | 0 |
| | Potencia instalada | Potencia retirada | Potencia a instalar |
| | 515 MWe | 60 MWe | 0 MWe |

● FUTURO PROYECTADO

En 2009 se planificó una nueva construcción nuclear en el sitio de la central nuclear Borssele. A principios de 2012, la empresa constructora anunció que dejaría de lado sus planes por (al menos) algunos años, considerando el entorno económico desfavorable actual y las incertidumbres que introdujo.

Al momento Holanda no cuenta con una planificación concreta sobre la ampliación de su parque nuclear, hasta el año 2030.

● PROYECCIÓN DE POTENCIA INSTALADA NUCLEAR

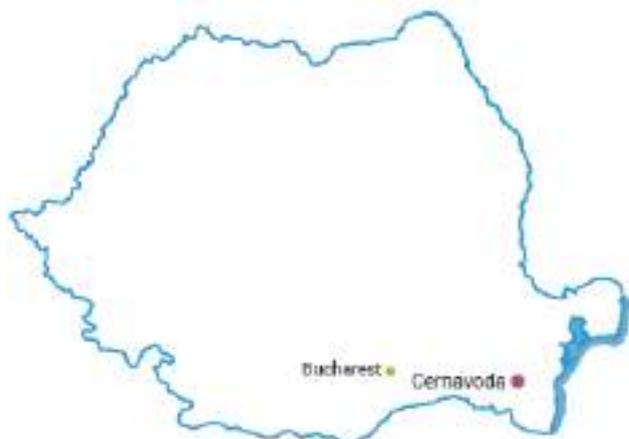
La proyección de mínima y máxima potencia instalada nuclear se realiza en base a la fecha en que se retire de servicio la central BORSSELE: año 2023 de mínima (50 años de operación) y año 2028 de máxima (55 años de operación).

➤ GRÁFICA DE PROYECCIÓN DE POTENCIA INSTALADA DESDE EL AÑO 2019 HASTA EL AÑO 2030



Gráfico N° 29: Proyección de potencia instalada nuclear en Holanda

3.2.11. Rumania



Rumania tiene dos unidades de energía nuclear en operación con una participación de aproximadamente 17% sobre la producción total de energía del país.

El factor de carga promedio de las dos unidades rumanas es del 91,6% lo cual lo posiciona entre los más altos del mundo.

Actualmente el gobierno rumano se encuentra en la planificación de la expansión de su programa de energía nuclear.

● **ESTADO ACTUAL**

| ENERGÍA NUCLEAR DE RUMANIA | | | |
|--|----------------------|-----------------------------|---------------------------|
| Participación | Reactores operativos | Reactores fuera de servicio | Reactores en construcción |
| <p>■ No Nuclear ■ Nuclear</p> <p>17% 83%</p> | 2 | 0 | 0 |
| | Potencia instalada | Potencia retirada | Potencia a instalar |
| | 1411 MWe | 0 MWe | 0 MWe |

● **FUTURO PROYECTADO**

El gobierno rumano se encuentra en proceso de ampliación de su capacidad nuclear mediante la planificación de construcción y puesta en servicio de dos nuevas unidades con tecnología CANDU dentro del complejo nuclear de Cernavoda, con una potencia proyectada de 720 MWe cada unidad.

El 22 de octubre de 2015, los accionistas de SNN (Sociedad Nacional Nucleoeléctrica rumana) junto con CGN (Corporación de Energía Nuclear de China) aprobaron el memorando de entendimiento para el desarrollo, construcción, operación y desmantelamiento de las Unidades 3 y 4 de la central nuclear de Cernavoda, que se firmó entre las partes el 9 de noviembre de 2015.

Después de varias prórrogas del período de negociación, SNN y CGN se encuentra actualmente en proceso de negociar el Acuerdo de Inversionistas y los Artículos de Incorporación de la nueva compañía de proyectos.

● PROYECCIÓN DE POTENCIA INSTALADA NUCLEAR

No está previsto retirar de servicio las centrales nucleares operativas ni se cuenta con una planificación concreta de ampliación de la potencia instalada nuclear hasta el año 2030.

➤ GRÁFICA DE PROYECCIÓN DE POTENCIA INSTALADA DESDE EL AÑO 2019 HASTA EL AÑO 2030



Gráfico N° 30: Proyección de potencia instalada nuclear en Rumania

3.2.12. Eslovaquia



Eslovaquia es un país con más de 60 años de experiencia en la construcción y operación de centrales nucleares. Actualmente cuenta con 4 centrales nucleares en operación con una participación del 55% sobre la generación total del país. Adicionalmente se encuentran en proceso de construcción dos nuevas unidades con una potencia proyectada de unos 470 MWe cada una.

● ESTADO ACTUAL

| ENERGÍA NUCLEAR DE ESLOVAQUIA | | | |
|-------------------------------|----------------------|-----------------------------|---------------------------|
| Participación | Reactores operativos | Reactores fuera de servicio | Reactores en construcción |
| | 4 | 3 | 2 |
| | Potencia instalada | Potencia retirada | Potencia a instalar |
| | 1950 MWe | 1023 MWe | 942 MWe |

● FUTURO PROYECTADO

Los planes para una nueva construcción nuclear se delinearon en la Estrategia de Seguridad Energética de la República Eslovaca de octubre de 2008, que incorpora los planes de energía nuclear en la Política Energética de 2006. La Estrategia de seguridad energética de 2008 tuvo como objetivo mantener la proporción de electricidad generada por las centrales nucleares en alrededor del 50% a través de las siguientes medidas:

- Finalización de las unidades Mochovce 3 y 4.
- Ampliación de capacidad de Mochovce 1 y 2 (180 MWe brutos).
- Construcción de un nuevo bloque de reactores en Bohunice para 2025 (1200 MWe brutos).

● PROYECCIÓN DE POTENCIA INSTALADA NUCLEAR

Proyección de mínima potencia instalada:

- La central en construcción MOCHOVCE-3 será conectada a la red en el año 2022.
- La central en construcción MOCHOVCE-4 será conectada a la red en el año 2023.
- No se le extiende la potencia bruta a ninguna central actualmente operativa.

Proyección de máxima potencia instalada:

- La central en construcción MOCHOVCE-3 será conectada a la red en el año 2020.
- La central en construcción MOCHOVCE-4 será conectada a la red en el año 2021.
- En el año 2028 se aumenta la capacidad de Mochovce 1 y 2 en un total de 360 MWe.

➤ GRÁFICA DE PROYECCIÓN DE POTENCIA INSTALADA DESDE EL AÑO 2019 HASTA EL AÑO 2030



Gráfico N° 31: Proyección de potencia instalada nuclear en Eslovaquia

3.2.13. Eslovenia

Eslovenia cuenta con una planta de energía nuclear operativa con tecnología PWR de 727 MWe y con una participación de aproximadamente 36% sobre la generación total del país.

La construcción de la central comenzó en 1975 por parte de Westinghouse y se conectó a la red en 1981, entrando en operación comercial en 1983.

En 2001 se amplió su capacidad en un 9% mediante el reemplazo de sus generadores de vapor. La vida útil de diseño de la planta era de 40 años pero en 2012 obtuvo la licencia para operar hasta los 60 años.



● **ESTADO ACTUAL**

| ENERGÍA NUCLEAR DE ESLOVENIA | | | |
|------------------------------|---------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| Participación | Reactores operativos | Reactores fuera de servicio | Reactores en construcción |
| | 1 | 0 | 0 |
| | Potencia instalada | Potencia retirada | Potencia a instalar |
| | 727 MWe | 0 MWe | 0 MWe |

- **FUTURO PROYECTADO**

Se está considerando la construcción de una unidad adicional de 1100 a 1600 MWe. Una solicitud para un segundo reactor en la central nuclear de Krsko fue presentada al ministerio de economía del país por GEN Energija en enero de 2010.

Se esperaba que el Parlamento tomara una decisión al respecto en 2011, y el proyecto sigue siendo un objetivo. El costo se estima en hasta 5.000 millones de euros y sería totalmente de Eslovenia.

- **PROYECCIÓN DE POTENCIA INSTALADA NUCLEAR**

No está previsto retirar de servicio la central nucleare operativa ni se cuenta con una planificación concreta de ampliación de la potencia instalada nuclear hasta el año 2030.

➤ **GRÁFICA DE PROYECCIÓN DE POTENCIA INSTALADA DESDE EL AÑO 2019 HASTA EL AÑO 2030**

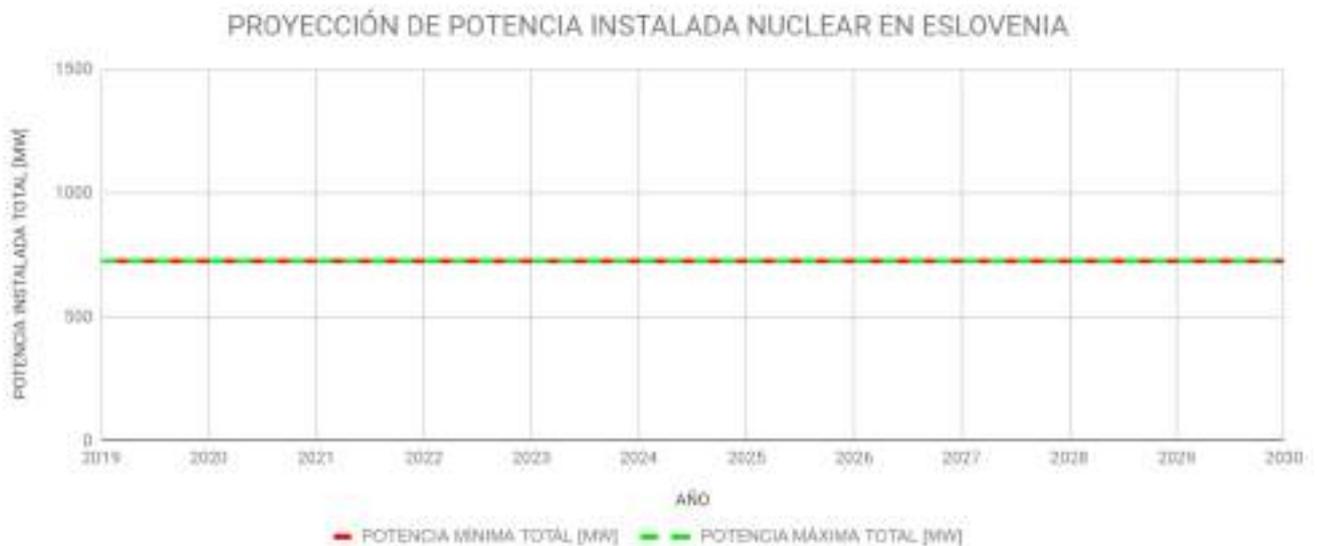


Gráfico N° 32: Proyección de potencia instalada nuclear en Eslovenia

3.2.14. España



España conectó a la red su primera central nuclear en el año 1971.

Actualmente cuenta con 7 centrales nucleares en operación comercial, correspondiente a una participación del 20% sobre la generación total del país.

El futuro de la energía nuclear español es incierto dado que el gobierno español no ha tomado una postura concreta sobre la continuidad de las centrales actuales ni de la ampliación de la capacidad nuclear del país.

● ESTADO ACTUAL

| ENERGÍA NUCLEAR DE ESPAÑA | | | |
|---------------------------|----------------------|-----------------------------|---------------------------|
| Participación | Reactores operativos | Reactores fuera de servicio | Reactores en construcción |
| | 7 | 3 | 0 |
| | Potencia instalada | Potencia retirada | Potencia a instalar |
| | 7416 MWe | 1116 MWe | 0 MWe |

● FUTURO PROYECTADO

El gobierno español planea aprobar un Plan Integral de Energía y Clima que realineará la combinación energética para cumplir con los compromisos europeos respecto al cambio climático.

El plan español establecerá la contribución de cada fuente de energía a la combinación de energía, incluida probablemente la energía nuclear, cuyo objetivo es garantizar la competitividad de la economía, el crecimiento económico, la creación de empleo y la sostenibilidad ambiental.

En la actualidad España no tiene ningún proyecto concreto sobre la construcción de nuevas centrales nucleares.

● PROYECCIÓN DE POTENCIA INSTALADA NUCLEAR

Proyección de mínima potencia instalada:

- Las centrales actualmente operativas se retirarán de servicio a medida que cumplan los 45 años de operación.

Proyección de máxima potencia instalada:

- Las centrales actualmente operativas se retirarán de servicio a medida que cumplan los 50 años de operación.

➤ GRÁFICA DE PROYECCIÓN DE POTENCIA INSTALADA DESDE EL AÑO 2019 HASTA EL AÑO 2030

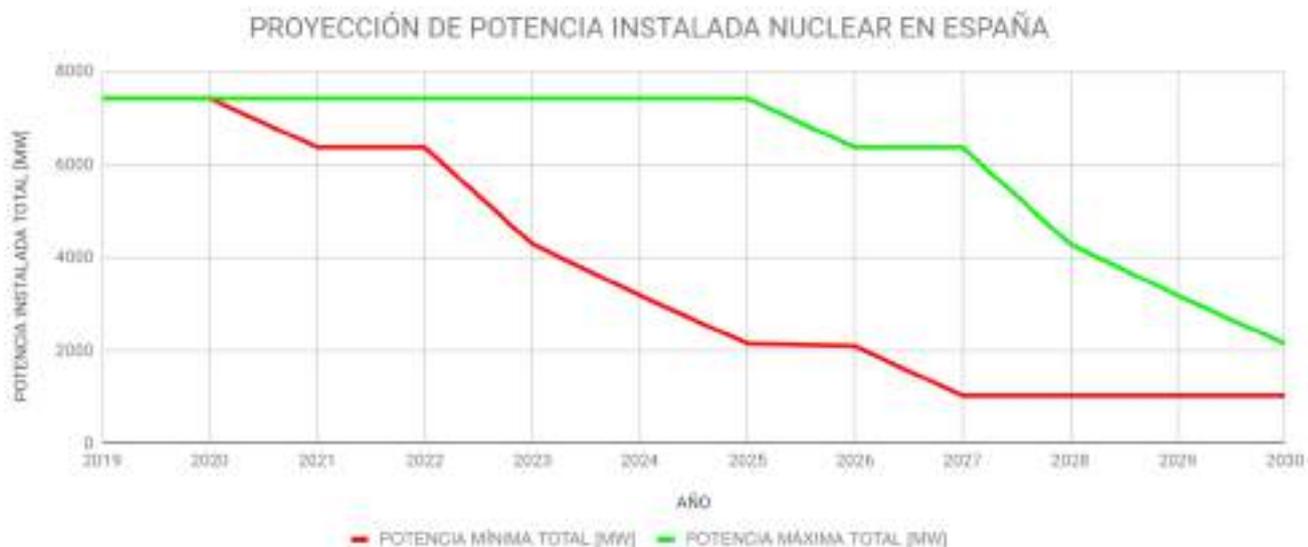


Gráfico N° 33: Proyección de potencia instalada nuclear en España

3.2.15. Suecia



El primer reactor de energía nuclear comercial de Suecia, Oskarshamn 1, se puso en servicio en 1972 y fue seguido por otras doce unidades ubicadas en Barsebäck, Oskarshamn, Ringhals y Forsmark, las cuales comenzaron a funcionar entre los años 1975 y 1985.

Actualmente Suecia dispone de 8 unidades operativas con una participación aproximada del 40% sobre la generación total del país.

Respecto al futuro de la energía nuclear en Suecia, si bien está previsto el reemplazo gradual de las unidades operativas, a la actualidad no existe ningún proyecto concreto.

● **ESTADO ACTUAL**

| ENERGÍA NUCLEAR DE SUECIA | | | |
|---------------------------|---------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| Participación | Reactores operativos | Reactores fuera de servicio | Reactores en construcción |
| | 8 | 5 | 0 |
| | Potencia instalada | Potencia retirada | Potencia a instalar |
| | 8984 MWe | 2395 MWe | 0 MWe |

● **FUTURO PROYECTADO**

Luego del accidente de Chernobyl de 1986, el gobierno sueco se opuso al avance de la energía nuclear en el país, lo que dio lugar a una nueva legislación en 1987, la cual dispuso la prohibición de construcción de nuevas centrales nucleares. En 1998 se decidió que las unidades gemelas de BWR, Barsebäck 1 y 2, deberían cerrarse permanentemente en 1999 y 2005, respectivamente.

El 1 de enero de 2011 se hicieron modificaciones a la Ley (1984: 3) sobre Actividades Nucleares y el Código del Medio Ambiente (1998: 808) para permitir la sustitución gradual de los reactores de energía nuclear existentes por otros nuevos.

Además, se abolió la Ley de eliminación gradual de la energía nuclear (1997: 1320) y se eliminaron las prohibiciones en la Ley (1984: 3) sobre actividades nucleares en la construcción de nuevos reactores de energía nuclear.

Si bien las actividades relacionadas con el reemplazo de las centrales nucleares operativas no están en la agenda principal del gobierno sueco, las evaluaciones y análisis correspondientes siguen en curso.

● PROYECCIÓN DE POTENCIA INSTALADA NUCLEAR

Proyección de mínima potencia instalada:

- Las centrales actualmente operativas se retirarán de servicio a medida que cumplan los 50 años de operación.

Proyección de máxima potencia instalada:

- Las centrales actualmente operativas se retirarán de servicio a medida que cumplan los 55 años de operación.

➤ GRÁFICA DE PROYECCIÓN DE POTENCIA INSTALADA DESDE EL AÑO 2019 HASTA EL AÑO 2030



Gráfico N° 34: Proyección de potencia instalada nuclear en Suecia

3.2.16. Suiza



Suiza cuenta en la actualidad con cinco centrales nucleares operativas con una capacidad total de 3,5 GWe y una tasa de disponibilidad anual cercana al 90%, posicionando al país en uno de los mejores del mundo es esta característica.

La participación nuclear en Suiza es de un 38% respecto de la generación total del país. La decisión actual del gobierno suizo es retirarse gradualmente de la energía nuclear.

● **ESTADO ACTUAL**

| ENERGÍA NUCLEAR DE SUIZA | | | |
|--------------------------|---------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| Participación | Reactores operativos | Reactores fuera de servicio | Reactores en construcción |
| | 5 | 1 | 0 |
| | Potencia instalada | Potencia retirada | Potencia a instalar |
| | 3485 MWe | 7 MWe | 0 MWe |

● **FUTURO PROYECTADO**

Tras el accidente de Fukushima Daiichi, el Consejo Federal anunció en marzo de 2011 que se habían suspendido los procedimientos pendientes para tramitar las solicitudes de licencias generales para nuevas centrales nucleares.

En el transcurso de 2011, el Consejo Federal y el Parlamento tomaron la decisión de retirarse de la energía nuclear paso a paso y sentaron las bases de una nueva política energética (Estrategia energética 2050).

La intención es desmantelar las cinco plantas de energía nuclear de Suiza cuando lleguen al final de su vida útil y no reemplazarlas por otras nuevas.

● PROYECCIÓN DE POTENCIA INSTALADA NUCLEAR

Proyección de mínima potencia instalada:

- Las centrales actualmente operativas se retirarán de servicio a medida que cumplan los 50 años de operación.

Proyección de máxima potencia instalada:

- Las centrales actualmente operativas se retirarán de servicio a medida que cumplan los 55 años de operación.

➤ GRÁFICA DE PROYECCIÓN DE POTENCIA INSTALADA DESDE EL AÑO 2019 HASTA EL AÑO 2030

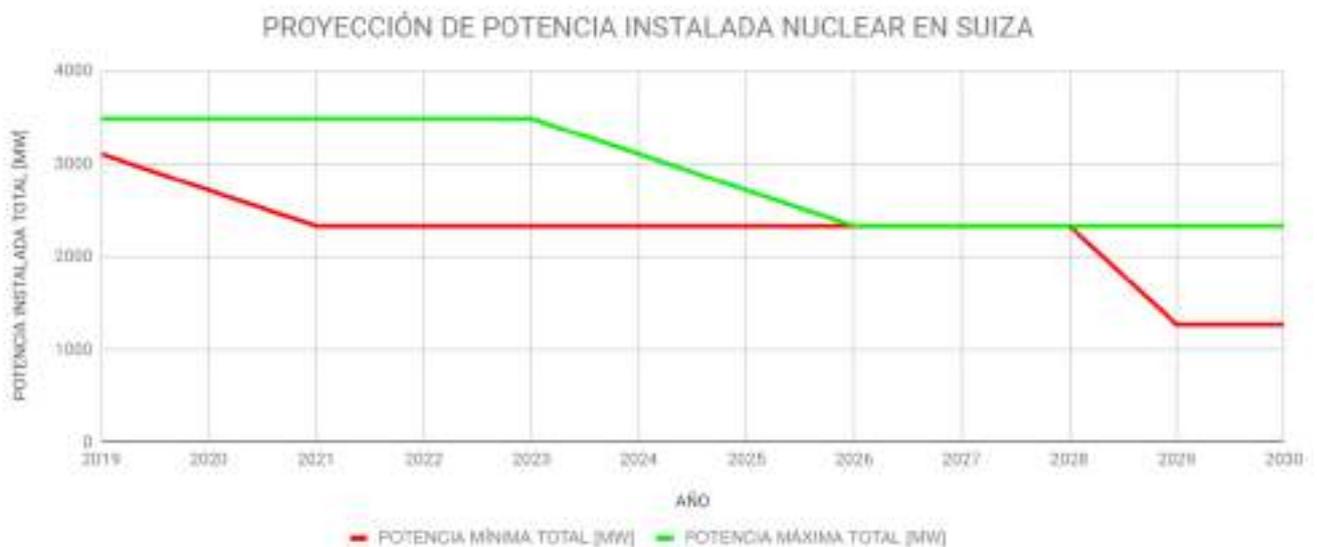


Gráfico N° 35: Proyección de potencia instalada nuclear en Suiza

3.2.17. Ucrania



La energía nuclear en Ucrania comenzó su desarrollo a principios de los años 70 con la construcción de la primera unidad de Chernobyl.

En la actualidad el país cuenta con 15 centrales operativas con una participación nuclear del 53% respecto de la generación total, característica que ubica a Ucrania como el segundo país del mundo con mayor participación nuclear, después de Francia.

● **ESTADO ACTUAL**

| ENERGÍA NUCLEAR DE UCRANIA | | | |
|----------------------------|----------------------|-----------------------------|---------------------------|
| Participación | Reactores operativos | Reactores fuera de servicio | Reactores en construcción |
| | 15 | 4 | 2 |
| | Potencia instalada | Potencia retirada | Potencia a instalar |
| | 13835 MWe | 3800 MWe | 2178 MWe |

● **FUTURO PROYECTADO**

De acuerdo con la Estrategia de Energía de Ucrania para el período hasta 2030, está previsto mantener la participación nuclear en un 50% respecto de la generación total.

Luego del 2030 la participación nuclear estará sujeta a una revisión basada en los indicadores macroeconómicos de la economía de Ucrania, las condiciones de los mercados mundiales de recursos energéticos y el grado de desarrollo e implementación de soluciones tecnológicas innovadoras en el sector energético.

El desarrollo de la generación de energía nuclear durante el período hasta 2030 incluirá:

- Extender la vida útil de las plantas actuales más allá de su término de vida de diseño.
- Planificar la construcción de unidades de potencia que reemplacen las capacidades actuales de las centrales en operación.
- Finalizar la construcción de las unidades 3 y 4 de la central nuclear de Khmel'nitski.
- Planificar la construcción de unidades de potencia en nuevos sitios.

● PROYECCIÓN DE POTENCIA INSTALADA NUCLEAR

Para la proyección de mínima potencia instalada se considera que las centrales Khmel'nitski 3 y 4 se pondrán en servicio en los años 2024 y 2025 respectivamente. Respecto a la proyección de máxima, los años de puesta en marcha de ambas unidades serán 2022 y 2023 respectivamente.

Respecto de las centrales actualmente operativas, se considera que no serán retiradas de servicio en el período comprendido entre los años 2019 y 2030.

➤ GRÁFICA DE PROYECCIÓN DE POTENCIA INSTALADA DESDE EL AÑO 2019 HASTA EL AÑO 2030

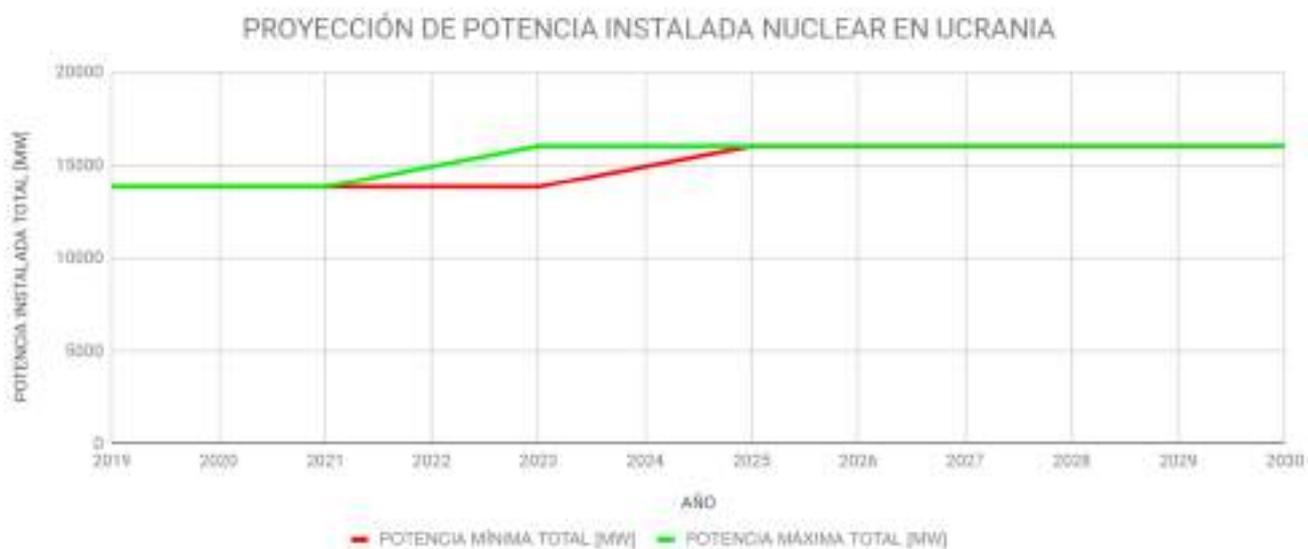
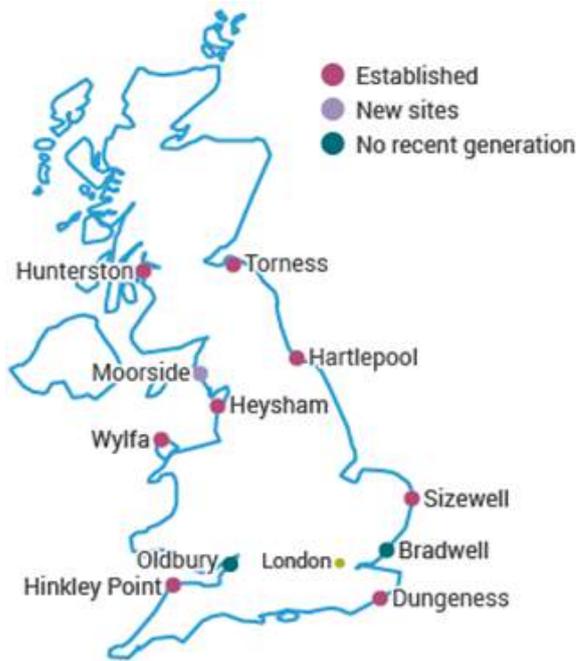


Gráfico N° 36: Proyección de potencia instalada nuclear en Ucrania

3.2.18. Reino Unido



El Reino Unido ha tenido una amplia gama de centrales nucleares con una gran variedad de diseños que abarcan casi 50 años. Las primeras centrales nucleares, los reactores Magnox, comenzaron a funcionar entre 1956 y 1971.

Actualmente cuentan con 15 reactores de energía nuclear operacionales, que representan el 18% del total de la generación eléctrica del país.

Según la Estrategia de Crecimiento Limpio de 2017, el Gobierno de Reino Unido está comprometido a aumentar su capacidad nuclear mediante la construcción de nuevas unidades. Sin embargo, cerca del 50% de su capacidad nuclear actual terminará su vida útil de diseño para el año 2025.

● ESTADO ACTUAL

| ENERGÍA NUCLEAR DE REINO UNIDO | | | |
|--------------------------------|----------------------|-----------------------------|---------------------------|
| Participación | Reactores operativos | Reactores fuera de servicio | Reactores en construcción |
| | 15 | 30 | 1 |
| | Potencia instalada | Potencia retirada | Potencia a instalar |
| | 10362 MWe | 5335 MWe | 1720 MWe |

● FUTURO PROYECTADO

El Gobierno ha tomado una serie de acciones de facilitación para fomentar la construcción de nuevas plantas nucleares y la industria ha propuesto hasta 17.8 GW de capacidad de construcción.

El primer reactor, en Hinkley Point C, está en construcción y está programado para entrar en funcionamiento en 2025.

Reino Unido cuenta con ciertas propuestas de empresas para planificar la construcción de nuevas plantas:

- EDF y CGN tienen planes para otros dos EPR en Sizewell (3,3 GW). Las dos compañías también pretenden implementar la tecnología HPR-1000 en Bradwell.
- Horizon Nuclear Power, propiedad de Hitachi-GE Nuclear Energy Ltd, propone construir dos reactores avanzados de agua en ebullición (ABWR) en cada uno de sus sitios en Wylfa y Oldbury (2,8 GW cada uno).
- NuGen, actualmente propiedad de Toshiba, propone construir hasta 3,3 GW de generación de energía nuclear en el sitio de Moorside cerca de Sellafield.

A continuación se presenta un resumen de las centrales planificadas y propuestas para Reino Unido:

| Proveedor | Reactor/sitio | Localidad | Tipo | Pot. Bruta [MW] | Inicio obra | Puesta en marcha |
|---------------------------|---------------------|-----------------|----------------------|-----------------|------------------|------------------|
| EDF Energy | Hinkley Point C2 | Somerset | EPR | 1720 | 2020 | 2027 |
| EDF Energy | Sizewell C1 | Suffolk | EPR | 1670? | | ? |
| | Sizewell C2 | Suffolk | EPR | 1670? | | ? |
| Total planificados | 3 unidades | | | 5060 MWe | | |
| China General Nuclear | Bradwell B1 | Essex | Hualong One | 1150 | | |
| China General Nuclear | Bradwell B2 | Essex | Hualong One | 1150 | | |
| Horizon | Wylfa Newydd 1&2 | Wales | ABWR | 2760 | | |
| Horizon | Oldbury B1&B2 | Gloucestershire | ABWR | 2760 | | |
| Total propuestos | 6 unidades | | | 7820 MWe | | |
| <i>GE Hitachi</i> | <i>Sellafield</i> | <i>Cumbria</i> | <i>2 x PRISM</i> | <i>2 x 311</i> | <i>Cancelled</i> | |
| <i>Candu Energy</i> | <i>Sellafield</i> | <i>Cumbria</i> | <i>2 x Candu EC6</i> | <i>2 x 740</i> | <i>Cancelled</i> | |
| <i>NuGeneration</i> | <i>Moorside 1-3</i> | <i>Cumbria</i> | <i>3x AP1000</i> | <i>3 x 1135</i> | <i>Cancelled</i> | |

Tabla N°2: Reactores planificados por Reino Unido

● PROYECCIÓN DE POTENCIA INSTALADA NUCLEAR

Proyección de mínima potencia instalada:

- Las centrales actualmente operativas se retirarán de servicio a medida que cumplan los 50 años de operación.
- La central en construcción HINKLEY POINT C-1 será puesta en servicio en el año 2027.
- La central planificada HINKLEY POINT C-2 será puesta en servicio en el año 2030.

Proyección de máxima potencia instalada:

- Las centrales actualmente operativas se retirarán de servicio a medida que cumplan los 55 años de operación.
- La central en construcción HINKLEY POINT C-1 será puesta en servicio en el año 2025.
- La central planificada HINKLEY POINT C-2 será puesta en servicio en el año 2028.

➤ GRÁFICA DE PROYECCIÓN DE POTENCIA INSTALADA DESDE EL AÑO 2019 HASTA EL AÑO 2030



Gráfico N° 37: Proyección de potencia instalada nuclear en Reino Unido

3.3. Asia

3.3.1. Armenia



Armenia cuenta con un reactor de energía nuclear en operación cuya participación se corresponde aproximadamente con un tercio de la generación total del país.

El gobierno armenio actualmente se encuentra en la planificación de la extensión de operatividad de la central, cuya vida útil finaliza en el año 2027.

La estrategia energética de Armenia proyectada hasta el año 2036 considera la construcción de una nueva unidad nuclear.

- ESTADO ACTUAL

| ENERGÍA NUCLEAR DE ARMENIA | | | |
|----------------------------|----------------------|-----------------------------|---------------------------|
| Participación | Reactores operativos | Reactores fuera de servicio | Reactores en construcción |
| | 1 | 1 | 0 |
| | Potencia instalada | Potencia retirada | Potencia a instalar |
| | 408 MWe | 408 MWe | 0 MWe |

● FUTURO PROYECTADO

El 1 de noviembre de 2007, se adoptó el decreto gubernamental N° 1296, según el cual estaba previsto que nuevas unidades de energía nuclear se pusieran en funcionamiento inmediatamente después del cierre de la existente, para cubrir la falta de capacidad. Según ese documento, y teniendo en cuenta la necesidad de independencia energética del país, se dio preferencia a la construcción de unidad de energía nuclear de 1000 MWe.

El 10 de diciembre de 2015, se adoptó la Decisión del Protocolo N° 54 de la sesión gubernamental. Una vez más se declaró la necesidad de desarrollo nuclear, una medida que garantizaría el nivel necesario de seguridad e independencia energética para 2027 a través de la operación de una nueva central nuclear. Sin embargo, debido al proyecto de extensión de vida de la unidad nuclear actualmente operativa, las actividades de construcción de una nueva unidad se han pospuesto.

● PROYECCIÓN DE POTENCIA INSTALADA NUCLEAR

No está previsto retirar de servicio la central nuclear operativa ni se cuenta con una planificación concreta de ampliación de la potencia instalada nuclear hasta el año 2030.

➤ GRÁFICA DE PROYECCIÓN DE POTENCIA INSTALADA DESDE EL AÑO 2019 HASTA EL AÑO 2030



Gráfico N° 38: Proyección de potencia instalada nuclear en Armenia

3.3.2. China



China cuenta con 51 unidades de energía nuclear operativas y es el país del mundo con más unidades en construcción (11 unidades).

La energía nuclear tiene una participación del 4% sobre la generación total del país.

China se ha convertido en el país con mayor proyección nuclear del mundo, dado que además de las 11 unidades que se encuentran actualmente en construcción, el país tiene planificado construir 31 unidades más.

● **ESTADO ACTUAL**

| ENERGÍA NUCLEAR DE CHINA | | | |
|--------------------------|---------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| Participación | Reactores operativos | Reactores fuera de servicio | Reactores en construcción |
| | 51 | 0 | 11 |
| | Potencia instalada | Potencia retirada | Potencia a instalar |
| | 50431 MWe | 0 MWe | 14881 MWe |

● **FUTURO PROYECTADO**

De 2016 a 2020, China desarrollará proyectos de demostración de centrales nucleares de diseño propio, principalmente a lo largo del cinturón de energía nuclear costera, y completará la construcción de proyectos AP-1000, además de otros proyectos de energía nuclear.

Desde mediados del año 2010 hasta fines del año 2018 China puso en funcionamiento 35 unidades nucleares.

Para el año 2022 la capacidad instalada de las unidades de energía nuclear operativa se estima que alcance los 55 GW, y la de las unidades en construcción los 30 GW.

● PROYECCIÓN DE POTENCIA INSTALADA NUCLEAR

China no retirará de servicio ninguna unidad nuclear en el período analizado, dado que para el año 2030 la más antigua cumplirá 39 años de operación.

Proyección de mínima potencia instalada:

- Las centrales actualmente en construcción serán puestas en servicio luego de 10 años iniciada la obra.
- De las 31 centrales planificadas, se pondrán en servicio 12 unidades entre los años 2027, 2028, 2029 y 2030, a razón de 3 unidades por año.

Proyección de máxima potencia instalada:

- Las centrales actualmente en construcción serán puestas en servicio luego de 8 años iniciada la obra.
- De las 31 centrales planificadas, se pondrán en servicio 20 unidades entre los años 2027, 2028, 2029 y 2030, a razón de 5 unidades por año.

➤ GRÁFICA DE PROYECCIÓN DE POTENCIA INSTALADA DESDE EL AÑO 2019 HASTA EL AÑO 2030

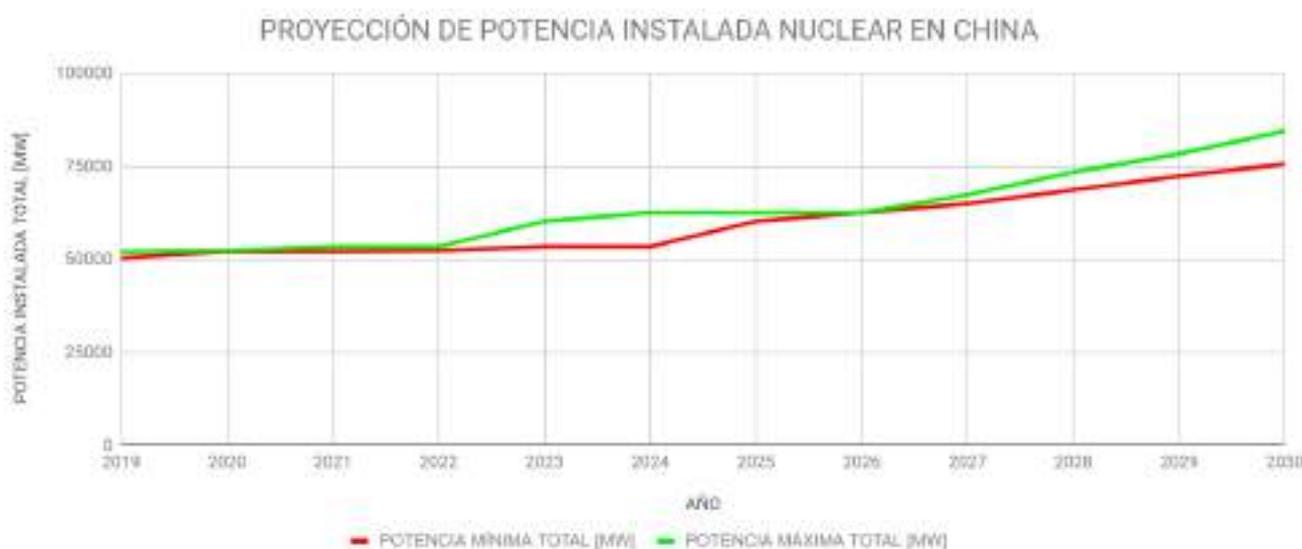


Gráfico N° 39: Proyección de potencia instalada nuclear en China

3.3.3. India



India cuenta en la actualidad con 22 centrales nucleares en operación con una capacidad total de 6780 MW.

La participación nuclear en India es de un 3% respecto de la generación total del país.

El gobierno está comprometido a aumentar la capacidad nuclear como parte de su programa de desarrollo de infraestructura masiva, para ello ha establecido objetivos ambiciosos de crecimiento.

En la actualidad se encuentran en proceso de construcción 7 centrales nucleares, lo que convierte a la India en el segundo país del mundo con mayor cantidad de centrales en construcción, después de China.

Una particularidad de la India es que apuesta fuertemente a la tecnología PHWR en la mayoría de sus centrales nucleares.

● ESTADO ACTUAL

| ENERGÍA NUCLEAR DE INDIA | | | |
|--------------------------|---------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| Participación | Reactores operativos | Reactores fuera de servicio | Reactores en construcción |
| | 22 | 0 | 7 |
| | Potencia instalada | Potencia retirada | Potencia a instalar |
| | 6780 MWe | 0 MWe | 5300 MWe |

● FUTURO PROYECTADO

En la actualidad se están construyendo cuatro reactores de tecnología PHWR de 700 MWe cada uno, dos reactores PWR 1000 MWe cada uno y uno FBR de 500 MWe.

Otros doce reactores de tipo PHWR están programados para comenzar en los próximos años.

Además, hay gran variedad de propuestas de futuras nuevas construcciones de tecnologías y potencias variadas. En los planes del gobierno Indio también se considera ampliar la construcción de reactores de tipo FBR de diseño propio.

A continuación se muestra una tabla con las características de los proyectos planificados y propuestos sobre construcción de nuevas plantas nucleares en la India.

Reactores nucleares planificados por la India (XII plan 2012, aprobado en 2015 y luego modificado en 2017 y 2018)

| Reactor | Estado | Tipo | Pot. Bruta | Dirección de proyecto | Inicio de construcción |
|-------------------|------------------------------|-------------|------------|-----------------------|------------------------|
| Gorakhpur 1 | Haryana (Fatehabad district) | PHWR | 700 | NPCIL | 2019? |
| Gorakhpur 2 | Haryana (Fatehabad district) | PHWR | 700 | NPCIL | 2020? |
| Gorakhpur 3&4 | Haryana (Fatehabad district) | PHWR x 2 | 700 | NPCIL | ? |
| Chutka 1&2 | Madhya Pradesh (Mandla) | PHWR x 2 | 700 | NPCIL | 2019? |
| Mahi Banswara 1&2 | Rajasthan | PHWR x 2 | 700 | NPCIL | 2019? |
| Mahi Banswara 3&4 | Rajasthan | PHWR x 2 | 700 | NPCIL | 2021? |
| Kaiga 5&6 | Karnataka | PHWR x 2 | 700 | NPCIL | 2019? |
| Kudankulam 5&6 | Tamil Nadu | AES-92 x 2 | 1050 | NPCIL | 2019? |
| Subtotal | | 14 unidades | 10,500 MWe | | |

Tabla N°3: Reactores planificados por la India

Reactores nucleares propuestos (XII plan 2012)

| Reactor | Estado | Tipo | Pot. Bruta [MW] | Dirección de proyecto |
|-------------------------------|---|------------------|-----------------|-------------------------|
| Tarapur? | Maharashtra? | AHWR | 300 | NPCIL |
| *Haripur 1&2* another site | West Bengal (but likely relocated, maybe to Kavali in Andhra Pradesh) | AES-2006 | 1200 | NPCIL |
| Kalpakkam 2&3 | Tamil Nadu | FBR x 2 | 600 | Bhavini |
| Kudankulam 7&8 | Tamil Nadu | AES 2006 | 1200 | NPCIL |
| *Kudankulam 9-12* | Andhra Pradesh | AES-2006 | 1200 | NPCIL |
| Bhimpur 1-4 | Madhya Pradesh | PHWR | 700 | NPCIL |
| Chutka 3&4 | Madhya Pradesh | PHWR | 700 | BHEL-NPCIL-GE? |
| Rajouli, Nawada 1&2 | Bihar | PHWR | 700 | NPCIL |
| ? | | PWR x 2 | 1000 | NPCIL/NTPC |
| Jaitapur 1&2 | Ratnagiri, Maharashtra | PWR – EPR | 1700 | NPCIL |
| Jaitapur 3&4 | Ratnagiri, Maharashtra | PWR – EPR | 1700 | NPCIL |
| ? | ? | FBR x 4 | 500 | Bhavini |
| Jaitapur 5&6 | Ratnagiri, Maharashtra | PWR – EPR | 1700 | NPCIL |
| Markandi (Pati Sonapur) | Orissa | PWR 6000 MWe | | NPCIL |
| Kovvada 1&2 | Srikakulam, Andhra Pradesh | AP1000 | 1250 | NPCIL |
| Kovvada 3&4 | Srikakulam, Andhra Pradesh | AP1000 | 1250 | NPCIL |
| Earlier: *Kovvada 1-6* | Originally Srikakulam, Andhra Pradesh | Originally ESBWR | 1600 | NPCIL |
| Nizampatnam 1-6 | Guntur, Andhra Pradesh | 6x? | 1200 | NPCIL |
| *Haripur 3-6* another site | West Bengal, Orissa or Kavali in Andhra Pradesh | AES-2006? | 1200 | NPCIL |
| Pulivendula | Kadapa, Andhra Pradesh | PWR? PHWR? | 1000? 700? | NPCIL 51%, AP Genco 49% |
| Kovvada 5&6 | Srikakulam, Andhra Pradesh | AP1000 | 1250 | NPCIL |
| Chhaya-Mithi Virdi 1-6 | Bhavnagar, Gujarat | AP1000 | 1250 | NPCIL |

Tabla N°4: Proyectos propuestos de nuevas centrales nucleares en la India

● PROYECCIÓN DE POTENCIA INSTALADA NUCLEAR

Proyección de mínima potencia instalada:

- Las centrales actualmente en construcción serán puestas en servicio según su tecnología, en el siguiente orden: PHWR años 2022 y 2023; PWR años 2026 y 2027; FBR año 2024.
- Las tres centrales más antiguas salen de servicio en el año 2030.
- De las 14 centrales planificadas, se pondrán en servicio 4 unidades entre los años 2027, 2028, 2029 y 2030, a razón de 1 unidad por año.

Proyección de máxima potencia instalada:

- Las centrales actualmente en construcción serán puestas en servicio según su tecnología, en el siguiente orden: PHWR años 2020 y 2021; PWR años 2024 y 2025; FBR año 2022.
- Ninguna central actualmente operativa sale de servicio antes del año 2030.
- De las 14 centrales planificadas, se pondrán en servicio 8 unidades entre los años 2027, 2028, 2029 y 2030, a razón de 2 unidades por año.

➤ GRÁFICA DE PROYECCIÓN DE POTENCIA INSTALADA DESDE EL AÑO 2019 HASTA EL AÑO 2030

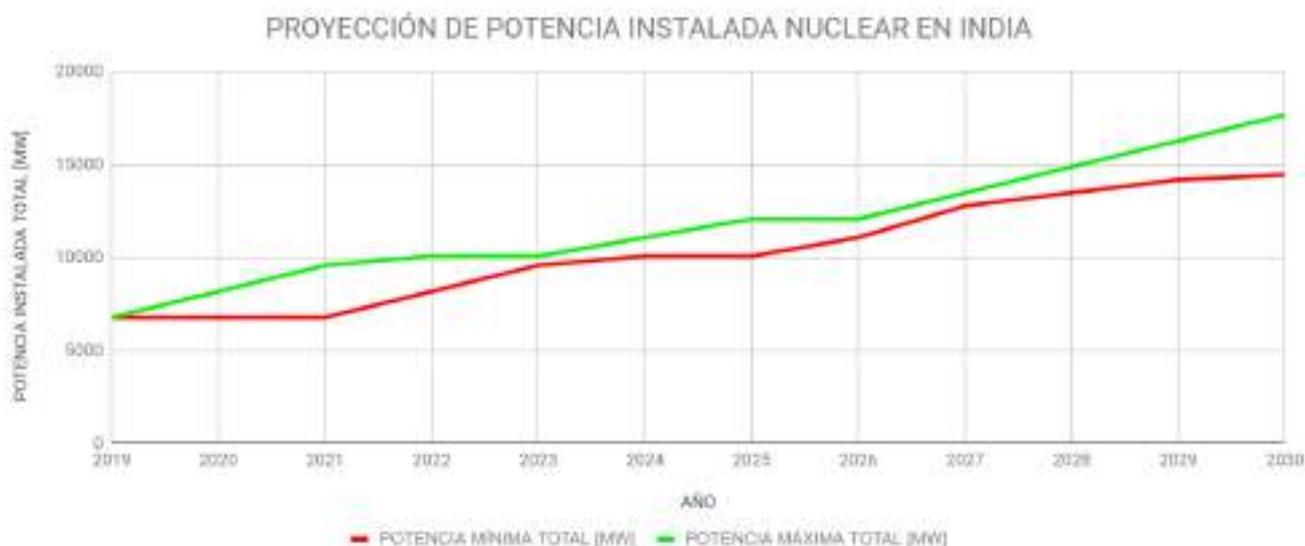


Gráfico N° 40: Proyección de potencia instalada nuclear en India

3.3.4. Irán



Irán cuenta con una central nuclear operativa representando el 2% de la generación total del país.

El gobierno planea instalar nuevas plantas de energía nuclear a largo plazo. Por tal motivo el gobierno iraní se encuentra en proceso de planificación para la construcción de dos nuevas centrales nucleares en el país.

Sin embargo, Irán está limitando sus actividades relacionadas con el enriquecimiento de uranio y agua pesada, bajo un plan de acción Integral acordado internacionalmente.

● ESTADO ACTUAL

| ENERGÍA NUCLEAR DE IRÁN | | | |
|-------------------------|---------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| Participación | Reactores operativos | Reactores fuera de servicio | Reactores en construcción |
| | 1 | 0 | 0 |
| | Potencia instalada | Potencia retirada | Potencia a instalar |
| | 1000 MWe | 0 MWe | 0 MWe |

● FUTURO PROYECTADO

La política de Irán es aumentar la participación de la energía nuclear en la generación de electricidad. En consecuencia, se firmó un contrato para la construcción de las Unidades BNPP 2 y 3, cuyos proyectos se muestran a continuación.

| Reactor / empresa | Tipo | Pot. Bruta MW | Inicio de obra estimada | Año puesta en marcha |
|-------------------|-----------|---------------|-------------------------|----------------------|
| BUSHEHR-2 | AEOI WWER | 1 057 | 2019 | 2026 |
| BUSHEHR-3 | AEOI WWER | 1 057 | 2019 | 2028 |

Tabla N°5: Proyectos planeados por Irán para iniciar su construcción

Además, para prevenir una crisis de agua en el futuro cercano, el país ha decidido desarrollar una instalación de desalinización mediante energía nuclear con una capacidad de producción de aproximadamente 200.000 m³/día para satisfacer la demanda de la provincia de Bushehr de agua potable.

El gobierno iraní apuesta a la industria nuclear no sólo con fines energéticos, sino también para lograr el desarrollo de recursos humanos y aumentar la participación industrial nacional y local.

● PROYECCIÓN DE POTENCIA INSTALADA NUCLEAR

Proyección de mínima potencia instalada:

- La central actualmente operativa no se retirará de servicio en el período 2019-2030.
- Las centrales planificadas BUSHEHR-2 y BUSHEHR-2 serán puestas en servicio en los años 2029 y 2030 respectivamente.

Proyección de máxima potencia instalada:

- La central actualmente operativa no se retirará de servicio en el período 2019-2030.
- Las centrales planificadas BUSHEHR-2 y BUSHEHR-2 serán puestas en servicio en los años 2027 y 2028 respectivamente.

➤ GRÁFICA DE PROYECCIÓN DE POTENCIA INSTALADA DESDE EL AÑO 2019 HASTA EL AÑO 2030



Gráfico N° 41: Proyección de potencia instalada nuclear en Irán

3.3.5. Japón



Japón tiene numerosos reactores de energía nuclear con gran capacidad operativa, pero en la actualidad su producción representó aproximadamente el 6% de la generación total del país.

Hasta el año 2011, Japón generaba alrededor del 30% de su electricidad mediante energía nuclear y se proyectaba un aumento de participación nuclear de hasta el 40% para el año 2017.

En la actualidad, y a consecuencia del accidente ocurrido en Fukushima en 2011, Japón no está considerando agregar capacidades de generación nuclear o reemplazar las instalaciones existentes.

Japón ha sacado de servicio 16 centrales nucleares progresivamente luego del accidente de Fukushima. Su participación nuclear en la generación total del país a partir del año 2011 cayó abruptamente, como se muestra a continuación.

| PAÍS | REACTOR | TIPO | POTENCIA [MW] | | | OPERADOR | PUESTA EN MARCHA | RETIRO DE SERVICIO | |
|--------------|---------|---------------------|---------------|-------|------|----------|------------------|--------------------|---------|
| | | | TÉRMICA | BRUTA | NETA | | | | |
| JAPÓN | | | | | | | | | |
| | JP -5 | FUKUSHIMA-DAIICHI-1 | BWR | 1380 | 460 | 439 | TEPCO | 1970-11 | 2011-5 |
| | JP -9 | FUKUSHIMA-DAIICHI-2 | BWR | 2381 | 784 | 760 | TEPCO | 1973-12 | 2011-5 |
| | JP -10 | FUKUSHIMA-DAIICHI-3 | BWR | 2381 | 784 | 760 | TEPCO | 1974-10 | 2011-5 |
| | JP -16 | FUKUSHIMA-DAIICHI-4 | BWR | 2381 | 784 | 760 | TEPCO | 1978-2 | 2011-5 |
| | JP -17 | FUKUSHIMA-DAIICHI-5 | BWR | 2381 | 784 | 760 | TEPCO | 1977-9 | 2013-12 |
| | JP -18 | FUKUSHIMA-DAIICHI-6 | BWR | 3293 | 1100 | 1067 | TEPCO | 1979-5 | 2013-12 |
| | JP -12 | GENKAI-1 | PWR | 1650 | 559 | 529 | KYUSHU | 1975-2 | 2015-4 |
| | JP -23 | IKATA-1 | PWR | 1650 | 566 | 538 | SHIKOKU | 1977-2 | 2016-5 |
| | JP -32 | IKATA-2 | PWR | 1650 | 566 | 538 | SHIKOKU | 1981-8 | 2016-5 |
| | JP -3 | TSURUGA-1 | BWR | 1070 | 357 | 340 | JAPCO | 1969-11 | 2015-4 |
| | JP -4 | MIHAMA-1 | PWR | 1031 | 340 | 320 | KEPCO | 1970-8 | 2015-4 |
| | JP -6 | MIHAMA-2 | PWR | 1456 | 500 | 470 | KEPCO | 1972-4 | 2015-4 |
| | JP -31 | MONJU | FBR | 714 | 280 | 246 | JAEA | 1995-8 | 2017-12 |
| | JP -15 | OHI-1 | PWR | 3423 | 1175 | 1120 | KEPCO | 1977-12 | 2018-3 |
| | JP -19 | OHI-2 | PWR | 3423 | 1175 | 1120 | KEPCO | 1978-10 | 2018-3 |
| | JP -7 | SHIMANE-1 | BWR | 1380 | 460 | 439 | CHUGOKU | 1973-12 | 2015-4 |

Tabla N°6: Centrales nucleares retiradas de servicio luego del accidente de Fukushima [PRIS-IAEA]

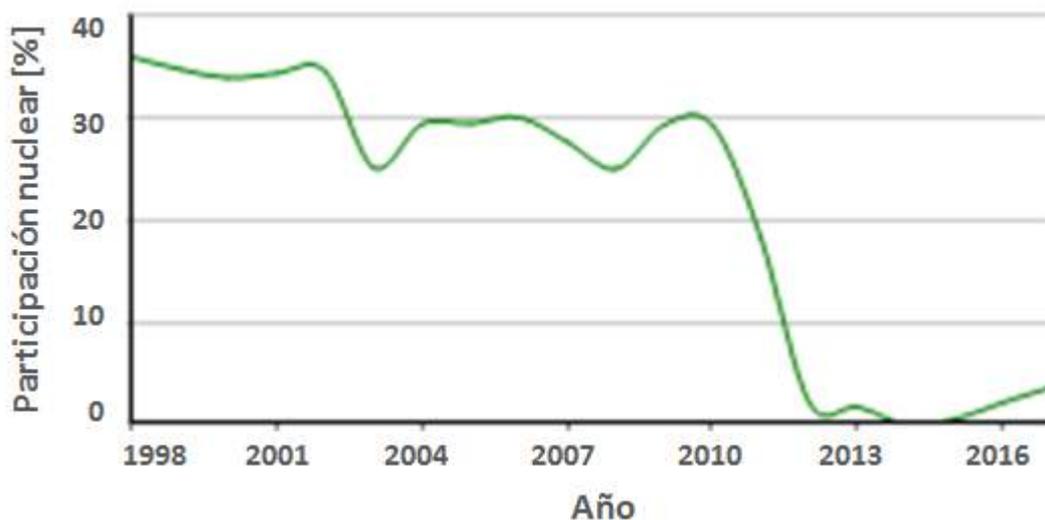


Gráfico N° 42: Evolución de la participación nuclear en Japón [PRIS-IAEA]

● ESTADO ACTUAL

| ENERGÍA NUCLEAR DE JAPÓN | | | |
|--------------------------|----------------------|-----------------------------|---------------------------|
| Participación | Reactores operativos | Reactores fuera de servicio | Reactores en construcción |
| | 39 | 21 | 2 |
| | Potencia instalada | Potencia retirada | Potencia a instalar |
| | 38566 MWe | 12398 MWe | 2756 MWe |

● FUTURO PROYECTADO

En la actualidad el Gobierno de Japón no está considerando agregar capacidades de generación de energía nuclear o reemplazar las instalaciones existentes.

La dependencia de la generación de energía nuclear se reducirá en la medida de lo posible mediante los programas de eficiencia energética e introduciendo energía renovable, así como mejorando la eficiencia en la generación térmica.

Sin embargo, el Foro Industrial Atómico de Japón, considera que alrededor de 30 reactores deben volver a conectarse a la red para cumplir con el objetivo del 20% - 22% de participación nuclear para el año 2030.

El gobierno considera que este es un objetivo alcanzable si se permite que los reactores existentes funcionen durante 50 años, más allá de los 40 años de vida vigentes actualmente en virtud de las regulaciones implementadas después de Fukushima-Daiichi.

● PROYECCIÓN DE POTENCIA INSTALADA NUCLEAR

Proyección de mínima potencia instalada:

- Las centrales actualmente operativas se retirarán de servicio a medida que cumplan los 50 años de operación.
- Las centrales actualmente en construcción no serán finalizadas en el período 2019-2030.

Proyección de máxima potencia instalada:

- Las centrales actualmente operativas se retirarán de servicio a medida que cumplan los 55 años de operación.
- Las centrales actualmente en construcción no serán finalizadas en el período 2019-2030.

➤ GRÁFICA DE PROYECCIÓN DE POTENCIA INSTALADA DESDE EL AÑO 2019 HASTA EL AÑO 2030

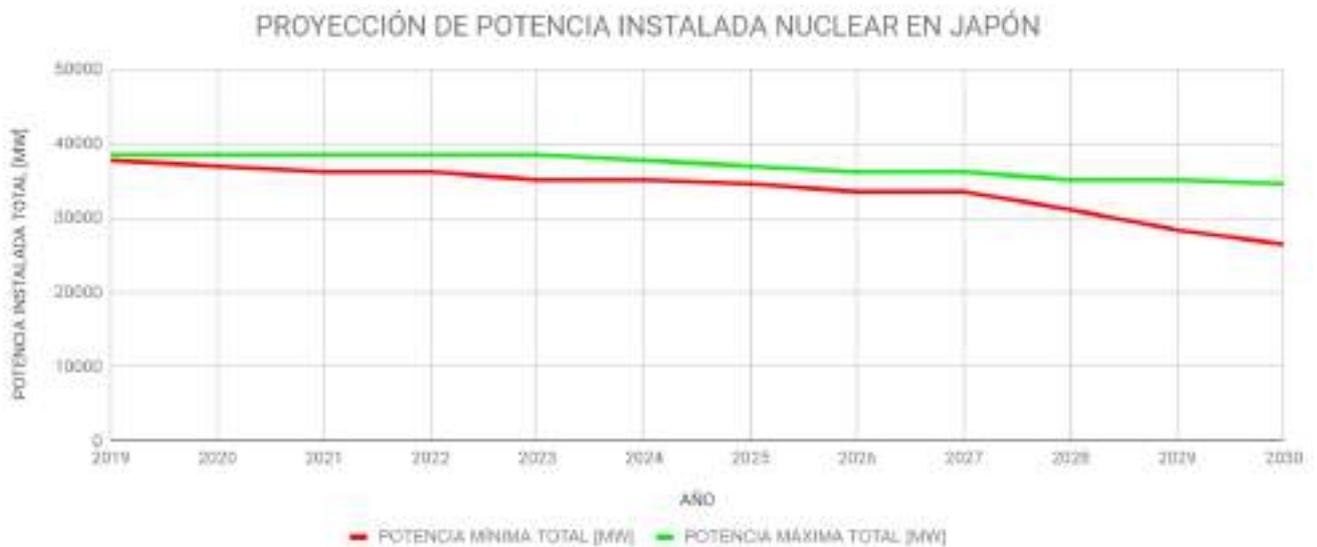


Gráfico N° 43: Proyección de potencia instalada nuclear en Japón

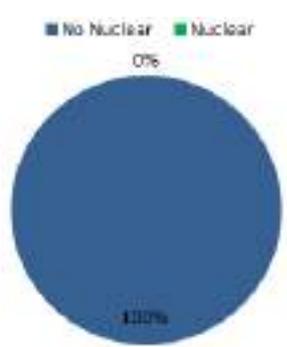
3.3.6. Kazajistán



Kazajistán tiene el 12% de los recursos de uranio del mundo. En 2018 produjo cerca de 21,700 toneladas de Uranio siendo uno de los principales productores del mundo.

Un único reactor nuclear que operó en el país lo hizo desde 1972 hasta 1999, generando electricidad y desalinizando el agua. Kazajistán tiene como objetivo fabricar y vender combustibles nucleares, por ello se está construyendo una planta de fabricación de combustibles nucleares con un 49% de capital chino.

● ESTADO ACTUAL

| ENERGÍA NUCLEAR DE KAZAJISTÁN | | | |
|---|----------------------|-----------------------------|---------------------------|
| Participación | Reactores operativos | Reactores fuera de servicio | Reactores en construcción |
|  <p>■ No Nuclear ■ Nuclear 0% 100%</p> | 0 | 1 | 0 |
| | Potencia instalada | Potencia retirada | Potencia a instalar |
| | 0 MWe | 90 MWe | 0 MWe |

● FUTURO PROYECTADO

El gobierno está comprometido con un alto nivel de exportaciones de uranio, planificando para 2019 una producción de 22.742 toneladas de uranio para exportación.

| AÑO | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 |
|------------|------|------|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------------------|
| TON URANIO | 5281 | 6637 | 8521 | 14,020 | 17,803 | 19,450 | 21,317 | 22,451 | 23,127 | 23,607 | 24,586 | 23,321 | 21,699 | 22,742 Planeado |

Tabla N°7: Producción anual de uranio de Kazajistán

El gobierno de Kazajistán planea completar un estudio de factibilidad para la construcción de un nuevo reactor nuclear, que probablemente se ubicará en Kurchatov. Sin embargo, en noviembre de 2016 el Ministro de Energía sostuvo que los planes para construir un reactor se han pospuesto debido a la falta de necesidad inmediata.

● PROYECCIÓN DE POTENCIA INSTALADA NUCLEAR

No está previsto por el gobierno de Kazajistán incorporar nuevas centrales nucleares a la red eléctrica en el período 2019-2030.

➤ GRÁFICA DE PROYECCIÓN DE POTENCIA INSTALADA DESDE EL AÑO 2019 HASTA EL AÑO 2030



Gráfico N° 44: Proyección de potencia instalada nuclear en Kazajistán

3.3.7. Pakistán



Pakistán cuenta con cinco plantas de energía nuclear en operación totalizando más del 7% de la generación total del país.

Actualmente se están construyendo dos nuevas unidades nucleares de 1100 MWe cada una, con el fin de aumentar la participación nuclear.

Sin embargo, Pakistán tiene un programa de armamento nuclear por fuera del tratado de no proliferación nuclear (TNP), por tal motivo permanece excluido en gran medida del comercio de plantas o materiales nucleares, lo que dificulta su desarrollo de la energía nuclear civil.

● ESTADO ACTUAL

| ENERGÍA NUCLEAR DE PAKISTÁN | | | |
|---|----------------------|-----------------------------|---------------------------|
| Participación | Reactores operativos | Reactores fuera de servicio | Reactores en construcción |
| <p>■ No Nuclear ■ Nuclear</p> <p>93% 7%</p> | 5 | 0 | 2 |
| | Potencia instalada | Potencia retirada | Potencia a instalar |
| | 1430 MWe | 0 MWe | 2200 MWe |

● FUTURO PROYECTADO

El Plan de Seguridad Energética formulado por el Gobierno estableció un objetivo concreto de 8800 MW de capacidad de generación nuclear para el año 2030. Se estableció este objetivo con el fin de aumentar la capacidad energética y de impulsar la tecnología nuclear Pakistaní.

Esto generará una reducción de costos debido al ahorro en importaciones de energía y por lo tanto aumentará la independencia energética del país.

A su vez, el gobierno pakistaní está planificando la construcción de una nueva central nuclear de tipo PWR de 1100 MW, cuyo inicio de obra estimado será en el año 2020 y la operación comercial en el año 2025.

● PROYECCIÓN DE POTENCIA INSTALADA NUCLEAR

La ejecución de la planificación del gobierno pakistaní está retrasada y aún no ha sido declarada en la Organización Internacional de Energía Atómica (OIEA). Por lo tanto, para realizar la proyección de la potencia instalada nuclear al año 2030, sólo se tomará en cuenta la finalización de las dos unidades actualmente en construcción.

Proyección de mínima potencia instalada:

- La central actualmente operativa KANUPP-1 se retirará de servicio cuando cumpla los 50 años de operación.
- Las centrales en construcción KANUPP-2 y KANUPP-3 serán finalizadas en los años 2024 y 2025 respectivamente.

Proyección de máxima potencia instalada:

- La central actualmente operativa KANUPP-1 se retirará de servicio cuando cumpla los 55 años de operación.
- Las centrales en construcción KANUPP-2 y KANUPP-3 serán finalizadas en los años 2022 y 2023 respectivamente.

➤ GRÁFICA DE PROYECCIÓN DE POTENCIA INSTALADA DESDE EL AÑO 2019 HASTA EL AÑO 2030

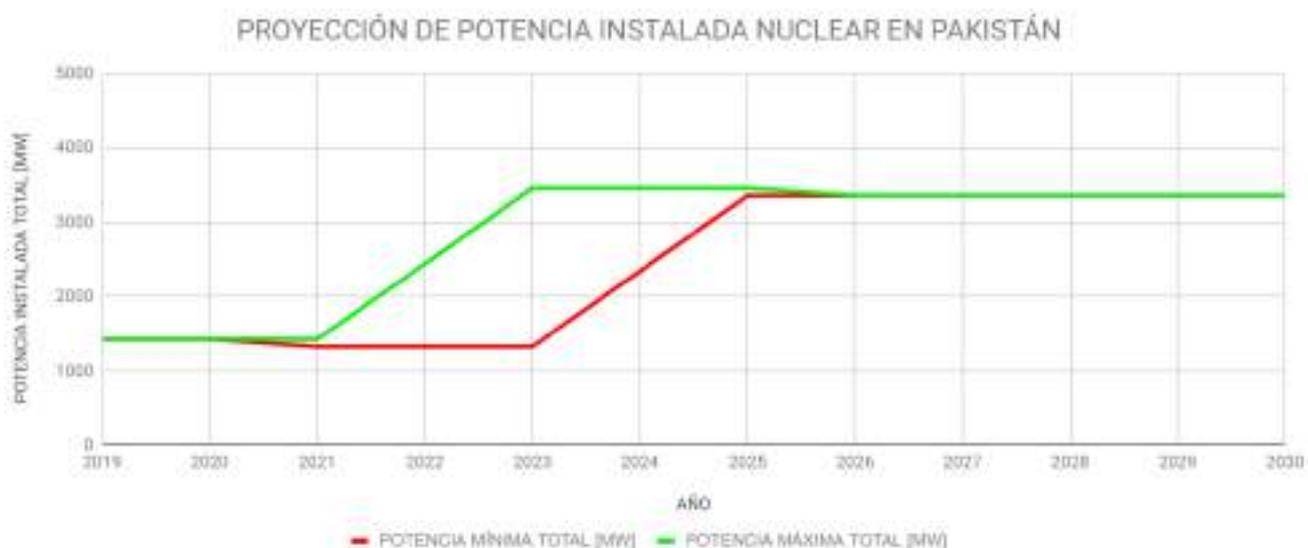


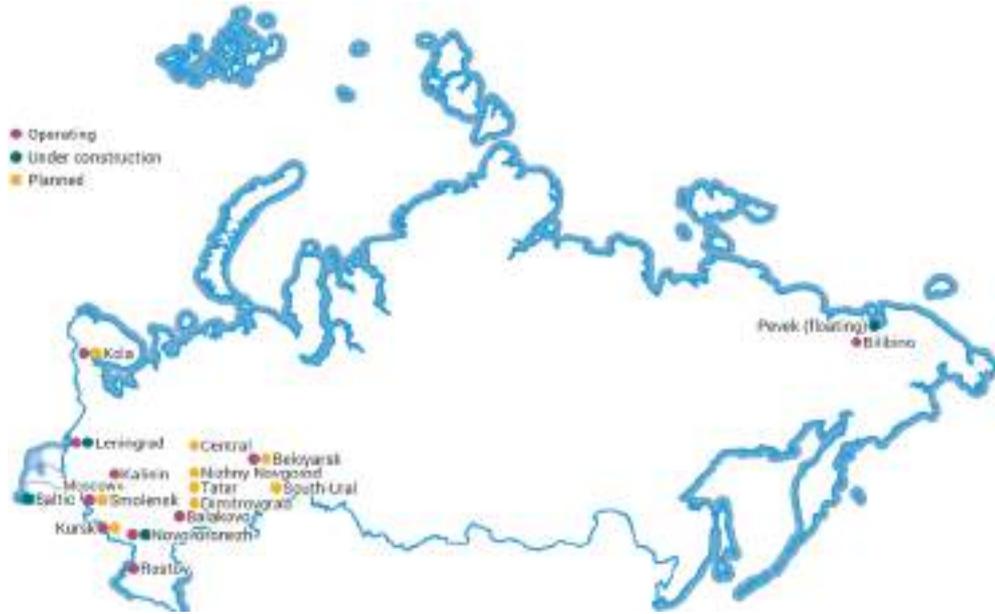
Gráfico N° 45: Proyección de potencia instalada nuclear en Pakistán

3.3.8. Rusia

La energía nuclear en la Federación Rusa es considerada una locomotora para el desarrollo de otras industrias. Rusia avanza constantemente con los planes para expandir la industria nuclear, incluido el desarrollo de nuevas tecnologías de reactores.

El gobierno ruso busca cerrar el ciclo del combustible y considera que los reactores rápidos son la clave para esto.

La exportación de bienes y servicios nucleares es una de las políticas y tareas económicas rusas más importantes. Unos 20 reactores de energía nuclear rusos están confirmados o planeados para ser exportados, lo que representa más de 130 mil millones de dólares en ingresos para el país.



● ESTADO ACTUAL

| ENERGÍA NUCLEAR DE RUSIA | | | |
|--------------------------|----------------------|-----------------------------|---------------------------|
| Participación | Reactores operativos | Reactores fuera de servicio | Reactores en construcción |
| | 35 | 8 | 6 |
| | Potencia instalada | Potencia retirada | Potencia a instalar |
| | 29107 MWe | 2266 MWe | 4919 MWe |

● FUTURO PROYECTADO

El último Programa Federal de Objetivos ruso prevé una participación nuclear del 25–30% en el suministro de electricidad para el año 2030, un 45–50% para el año 2050 y un 70–80% para fines de siglo.

A continuación se muestra la planificación de construcción de nuevas centrales nucleares en Rusia:

| Reactor | Tipo | Pot. Bruta | Inicio de Obra | Puesta en marcha |
|--|-----------------|------------|-----------------|------------------|
| Seversk | BREST-300 | 300 | Planeado, 2019? | 2026 |
| Leningrad II-3 | VVER 1200/V-491 | 1170 | Planeado, 2019? | 2023 |
| Leningrad II-4 | VVER 1200/V-491 | 1170 | Planeado, 2019? | 2024 |
| Kursk II-2 | VVER-TOI | 1255 | Planeado, 2019? | 2023 |
| Nizhny Novgorod 1 | VVER-TOI | 1255 | Planeado, 2023? | 2028 |
| Nizhny Novgorod 2 | VVER-TOI | 1255 | Planeado, 2025? | 2030 |
| Central/Kostroma 1 | VVER-TOI | 1250 | Planeado | by 2030 |
| Central/Kostroma 2 | VVER-TOI | 1250 | Planeado | by 2030 |
| Smolensk II-1 | VVER-TOI | 1250 | Planeado, 2022 | 2027 |
| Smolensk II-2 | VVER-TOI | 1250 | Planeado, 2024 | 2029 |
| Kursk II-3 | VVER-TOI | 1255 | Planeado | 2028 or later |
| Kursk II-4 | VVER-TOI | 1255 | Planeado | 2030 or later |
| Tatar | VVER-TOI | 1250 | Planeado | by 2030 |
| Kola II-1 | VVER-600/ V-498 | 600 | Planeado | by 2030 |
| Beloyarsk 5 | BN-1200 | 1220 | Planeado, 2025 | by 2031 |
| South Urals 1 | BN-1200 | 1220 | Planeado | 2033 |
| FNPP (for Sakha?) | RITM-200M | 55x2 | Planeado | 2020 |
| 7 units at four sites from the following list: | VVER-TOI | 1250 each | Planeado | 2031-35 |
| Subtotal sobre los 25 proyectos planeados | | 26,835 MWe | | |

Tabla N°8: Centrales nucleares planificadas por el gobierno ruso

A partir del año 2025, se estima que los reactores de neutrones rápidos desempeñarán un papel cada vez más importante en la Federación de Rusia y que gran parte del combustible gastado se recicle. Se proyecta para el año 2050 una capacidad nuclear generada por reactores rápidos cercana a los 34 GWe.

● PROYECCIÓN DE POTENCIA INSTALADA NUCLEAR

Proyección de mínima potencia instalada:

- Las centrales actualmente operativas se retirarán de servicio cuando cumpla los 50 años de operación.
- Las seis centrales en construcción serán puestas en servicio a razón de una por año a partir del año 2025.
- De la totalidad de las centrales planificadas, serán finalizadas 5 unidades entre los años 2028 y 2030.

Proyección de máxima potencia instalada:

- Las central actualmente operativa KANUPP-1 se retirará de servicio cuando cumpla los 55 años de operación.
- Las seis centrales en construcción serán puestas en servicio a razón de una por año a partir del año 2023.
- De la totalidad de las centrales planificadas, serán finalizadas 10 unidades entre los años 2025 y 2030.

➤ GRÁFICA DE PROYECCIÓN DE POTENCIA INSTALADA DESDE EL AÑO 2019 HASTA EL AÑO 2030

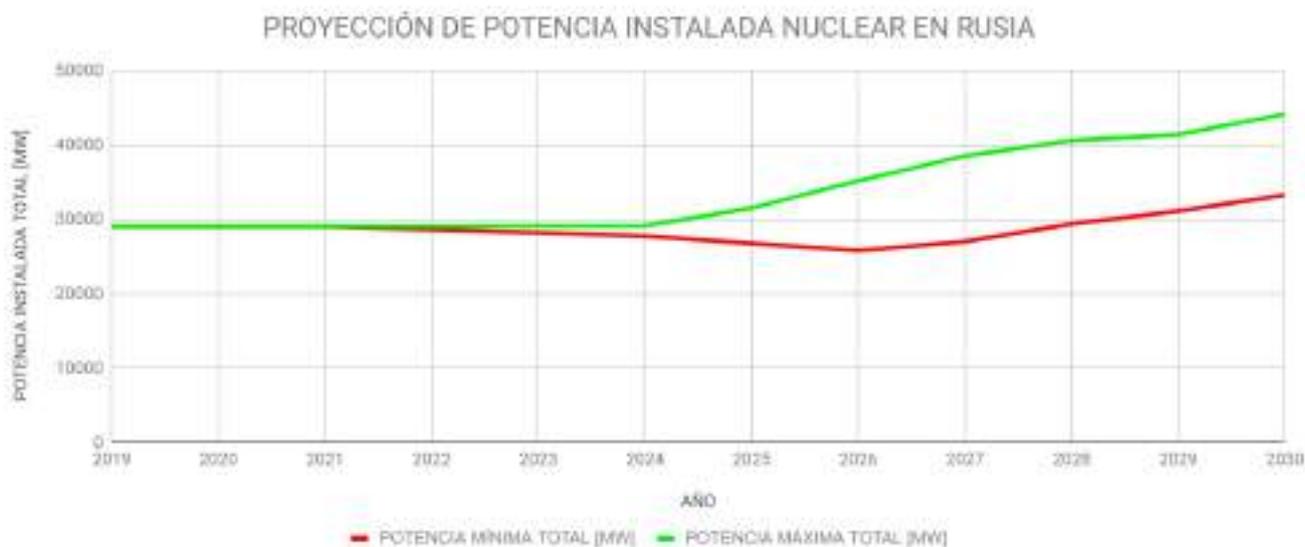


Gráfico N° 46: Proyección de potencia instalada nuclear en Rusia

3.3.9. República de Corea



La República de Corea tiene 24 reactores de energía nuclear operacionales, que representan una participación de aproximadamente el 24% sobre el total de la capacidad del país.

Actualmente se está llevando adelante la construcción de cinco reactores nuevos, que aportarán unos 7 GWe adicionales.

La República de Corea se encuentra entre los países de energía nuclear más importantes del mundo y exporta ampliamente su tecnología.

En el presente está involucrada en la construcción de cuatro reactores nucleares en los Emiratos Árabes Unidos, bajo un contrato de US\$ 20 mil millones.

● **ESTADO ACTUAL**

| ENERGÍA NUCLEAR DE LA REPÚBLICA DE COREA | | | |
|--|---------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| Participación | Reactores operativos | Reactores fuera de servicio | Reactores en construcción |
| | 24 | 1 | 5 |
| | Potencia instalada | Potencia retirada | Potencia a instalar |
| | 23507 MWe | 607 MWe | 7000 MWe |

● **FUTURO PROYECTADO**

De acuerdo con el Plan Básico de Oferta y Demanda de Electricidad a Largo Plazo de diciembre de 2017, luego de la puesta en marcha de las 5 unidades en construcción, no se iniciarán nuevos proyectos ni se extenderá la vida útil de las centrales nucleares existentes.

● PROYECCIÓN DE POTENCIA INSTALADA NUCLEAR

Proyección de mínima potencia instalada:

- Las centrales actualmente operativas se retirarán de servicio a medida que cumplan los 45 años de operación.
- Las 5 centrales actualmente en construcción se pondrán en servicio a razón de una por año a partir del año 2022.

Proyección de máxima potencia instalada:

- Las centrales actualmente operativas se retirarán de servicio a medida que cumplan los 50 años de operación.
- Las 5 centrales actualmente en construcción se pondrán en servicio a razón de una por año a partir del año 2020.

➤ GRÁFICA DE PROYECCIÓN DE POTENCIA INSTALADA DESDE EL AÑO 2019 HASTA EL AÑO 2030

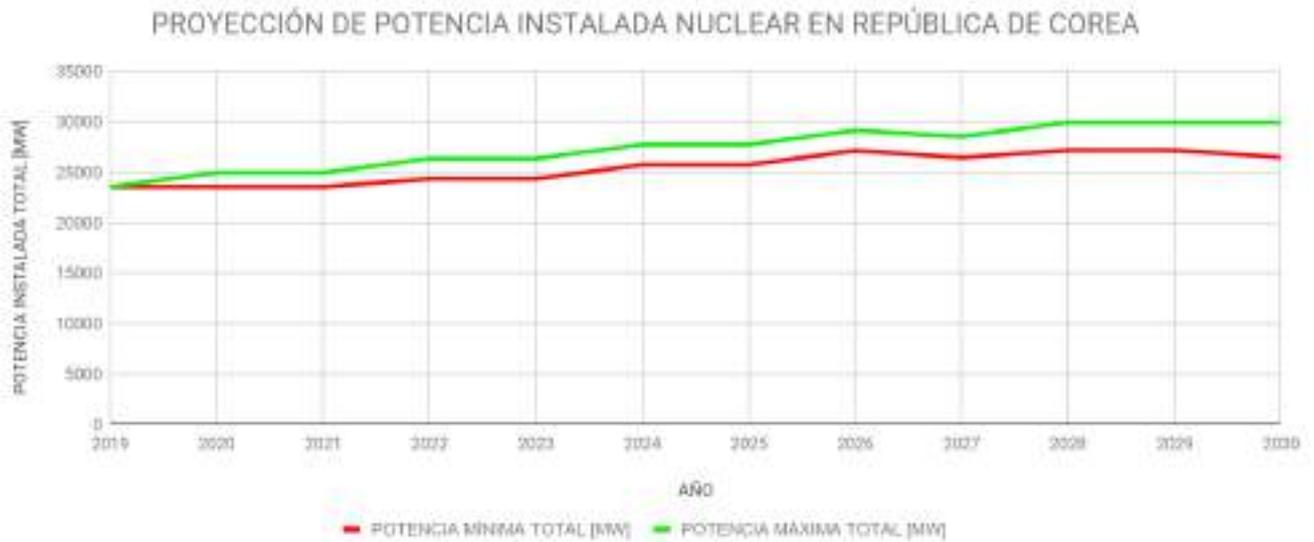
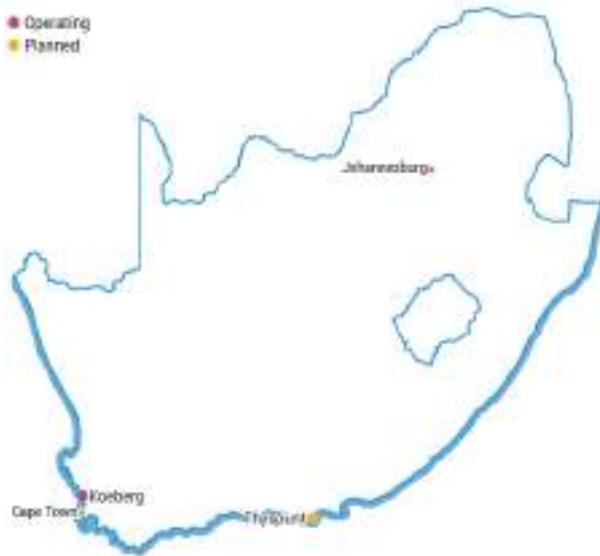


Gráfico N° 47: Proyección de potencia instalada nuclear en República de Corea

3.4. África

3.4.1. Sudáfrica



Sudáfrica cuenta con dos reactores de agua a presión (PWR) cuyas puestas en servicio se dieron en los años 1984 y 1985 respectivamente.

Dichas centrales representan aproximadamente el 5% de la capacidad total de Sudáfrica y son las únicas centrales nucleares comerciales de todo el continente africano.

El compromiso del gobierno con el futuro de la energía nuclear estaba consolidado, pero en agosto de 2018, la nueva administración postergó los planes de instalación de nueva capacidad nuclear para luego del año 2030.

● ESTADO ACTUAL

| ENERGÍA NUCLEAR DE SUDÁFRICA | | | |
|------------------------------|----------------------|-----------------------------|---------------------------|
| Participación | Reactores operativos | Reactores fuera de servicio | Reactores en construcción |
| | 2 | 0 | 0 |
| | Potencia instalada | Potencia retirada | Potencia a instalar |
| | 1940 MWe | 0 MWe | 0 MWe |

- **FUTURO PROYECTADO**

Al momento no existen planes por parte del gobierno sudafricano de construir nuevas centrales nucleares ni de ampliar la vida útil de las existentes.

- **PROYECCIÓN DE POTENCIA INSTALADA NUCLEAR**

No está previsto retirar de servicio las centrales nucleares operativas ni se cuenta con una planificación concreta de ampliación de la potencia instalada nuclear hasta el año 2030.

➤ **GRÁFICA DE PROYECCIÓN DE POTENCIA INSTALADA DESDE EL AÑO 2019 HASTA EL AÑO 2030**

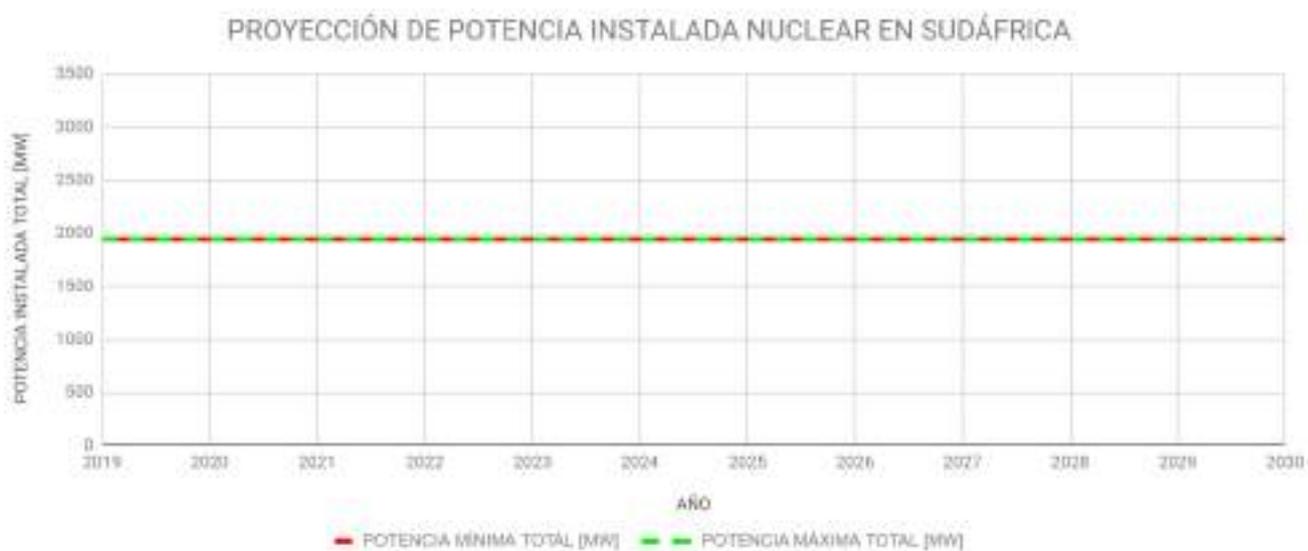


Gráfico N° 48: Proyección de potencia instalada nuclear en Sudáfrica

3.5. Países emergentes

A continuación se enumeran los países que aún no cuentan con centrales nucleares de potencia, pero que se encuentran en proceso de construcción o planificación de las mismas.

3.5.1. Bielorrusia



Bielorrusia cuenta con su primer planta de energía nuclear en construcción, la cual estará compuesta por dos unidades de 1200 MW cada una, en Ostrovets.

Se planifica la puesta en marcha de ambas unidades a partir de los años 2019 y 2020 respectivamente.

Se estima que ambas unidades nucleares generarán electricidad a la mitad del costo del gas importado de Rusia y que proporcionará alrededor del 30% de la electricidad total del país a partir del año 2020.

| | Reactor | MWe | Inicio de obra | Puesta en marcha | Operación comercial |
|-------------|---------------|-----------------|----------------|------------------|---------------------|
| Ostrovets 1 | VVER-1200/491 | 1194 (1109 net) | Nov 2013 | mid-2019 | Fines de 2019 |
| Ostrovets 2 | VVER-1200/491 | 1194 (1109 net) | May 2014 | mid-2020 | Despues de 2020 |
| Total (2) | | 2388 | | | |

Tabla N°9: Centrales nucleares en construcción en Bielorrusia

● PROYECCIÓN DE POTENCIA INSTALADA NUCLEAR

Proyección de mínima potencia instalada:

- Las centrales en construcción OSTROVETS-1 y OSTROVETS-2 serán puestas en servicio en los años 2022 y 2023 respectivamente.

Proyección de máxima potencia instalada:

- Las centrales en construcción OSTROVETS-1 y OSTROVETS-2 serán puestas en servicio en los años 2020 y 2021 respectivamente.

➤ GRÁFICA DE PROYECCIÓN DE POTENCIA INSTALADA DESDE EL AÑO 2019 HASTA EL AÑO 2030



Gráfico N° 49: Proyección de potencia instalada nuclear en Bielorrusia

3.5.2. Bangladesh

Alrededor del 20% de la población de Bangladesh permanece sin electricidad. El gobierno tiene el objetivo de que toda la población tenga acceso a la red eléctrica para el año 2021 y planifica conectar a 2,7 millones de hogares al sistema eléctrico nacional.

Considerando los planes del gobierno, Bangladesh tiene una creciente demanda de energía ($\approx 7\%$ /anual) y el objetivo es reducir su dependencia del gas natural. La planificación energética del país está evolucionando hacia una diversificación en la generación, en donde la energía nuclear es una de las opciones emergentes para satisfacer las crecientes necesidades.

Por ese motivo, en la actualidad Bangladesh se encuentra en proceso de construcción de sus dos primeras centrales nucleares de 1200 MWe cada una: Rooppur 1, cuya construcción se inició en noviembre de 2017 y Rooppur 2 en 2018. Se proyecta que ambas unidades comiencen su operación comercial en los años 2024 y 2025.

| Reactor | Modelo | Potencia bruta | Inicio obra | Operación comercial |
|-----------|-----------------|----------------|----------------|---------------------|
| Rooppur 1 | VVER-1200/V-523 | 1200 MWe | Noviembre 2017 | 2023 o 2024 |
| Rooppur 2 | VVER-1200/V-523 | 1200 MWe | Julio 2018 | 2024 o 2025 |

Tabla N°10: Centrales nucleares en construcción en Bangladesh

● **PROYECCIÓN DE POTENCIA INSTALADA NUCLEAR**

Proyección de mínima potencia instalada:

- Las centrales en construcción ROOPPUR-1 y ROOPPUR-2 serán puestas en servicio en los años 2027 y 2028 respectivamente.

Proyección de máxima potencia instalada:

- Las centrales en construcción ROOPPUR-1 y ROOPPUR-2 serán puestas en servicio en los años 2025 y 2026 respectivamente.

➤ **GRÁFICA DE PROYECCIÓN DE POTENCIA INSTALADA DESDE EL AÑO 2019 HASTA EL AÑO 2030**



Gráfico N° 50: Proyección de potencia instalada nuclear en Bangladesh

3.5.3. Turquía

Turquía ha tenido planes para incorporar generación nuclear a su matriz energética desde 1970. Hoy en día, los planes para la energía nuclear son un aspecto clave del objetivo del país para el crecimiento económico. Los desarrollos recientes han hecho que Rusia tome un papel de liderazgo en ofrecer financiamiento y construir 4800 MWe de capacidad nuclear.

En la actualidad, no hay ninguna planta de energía nuclear operativa en Turquía. Sin embargo, el gobierno turco planea instalar tres plantas de energía nuclear, incluidas 12 unidades de reactores nucleares.

La primera planta (Akkuyu), incluye cuatro unidades de reactores tipo WWER-1200, se construirá y operará en la provincia de Mersin en virtud del acuerdo firmado con la Federación Rusa en 2010. La primer unidad, Akkuyu 1, se encuentra actualmente en construcción desde abril de 2018 y está previsto que entre en funcionamiento a fines de 2023. Las otras unidades se pondrán en operación comercial a intervalos de un año hasta a finales de 2026.

La segunda planta nuclear (Sinop NPP) incluye también cuatro unidades. El reactor tipo ATMEA1 se construirá y operará en la provincia de Sinop en virtud del acuerdo con Japón realizado en 2013. Se proyecta que todas las unidades de la segunda planta nuclear estarán en funcionamiento para el año 2030.

| Reactor | Tipo | Pot. Bruta | Inicio de obra estimado | Operación comercial |
|----------------|-----------|------------|-------------------------|---------------------|
| Akkuyu NPP — 1 | WWER-1200 | 1200 MW(e) | 2018 | 2023 |
| Akkuyu NPP — 2 | WWER-1200 | 1200 MW(e) | 2019 | 2024 |
| Akkuyu NPP — 3 | WWER-1200 | 1200 MW(e) | 2020 | 2025 |
| Akkuyu NPP — 4 | WWER-1200 | 1200 MW(e) | 2021 | 2026 |
| Sinop NPP — 1 | ATMEA-1 | 1120 MW(e) | 2020 | 2025 |
| Sinop NPP — 2 | ATMEA-1 | 1120 MW(e) | 2021 | 2026 |
| Sinop NPP — 3 | ATMEA-1 | 1120 MW(e) | 2024 | 2029 |
| Sinop NPP — 4 | ATMEA-1 | 1120 MW(e) | 2025 | 2030 |

Tabla N°11: Planificación de centrales nucleares en Turquía

La tercer central nuclear planificada (Igneada NPP) estará emplazada en la provincia Kirklareli a 12 km de la frontera con Bulgaria. En este momento el país se encuentra negociando con el gobierno de China y la empresa Westinghouse para la construcción de esta central, la cual se espera que cuente con cuatro unidades: dos reactores tipo AP1000 y dos reactores tipo CAP1400.



Figura N°5: Localización de centrales nucleares planificadas en Turquía

● **PROYECCIÓN DE POTENCIA INSTALADA NUCLEAR**

Proyección de mínima potencia instalada:

- Las centra en construcción AKKUYU-1 será puesta en servicio en el año 2027.
- De las centrales planificadas sólo se pondrán en servicio las del proyecto AKKUYU (AKKUYU 2-3-4) en los años 2028, 2029 y 2030 respectivamente.

Proyección de máxima potencia instalada:

- Las centra en construcción AKKUYU-1 será puesta en servicio en el año 2025.
- De las centrales planificadas sólo se pondrán en servicio las del proyecto AKKUYU (AKKUYU 2-3-4) en los años 2026, 2027 y 2028 respectivamente.

➤ GRÁFICA DE PROYECCIÓN DE POTENCIA INSTALADA DESDE EL AÑO 2019 HASTA EL AÑO 2030

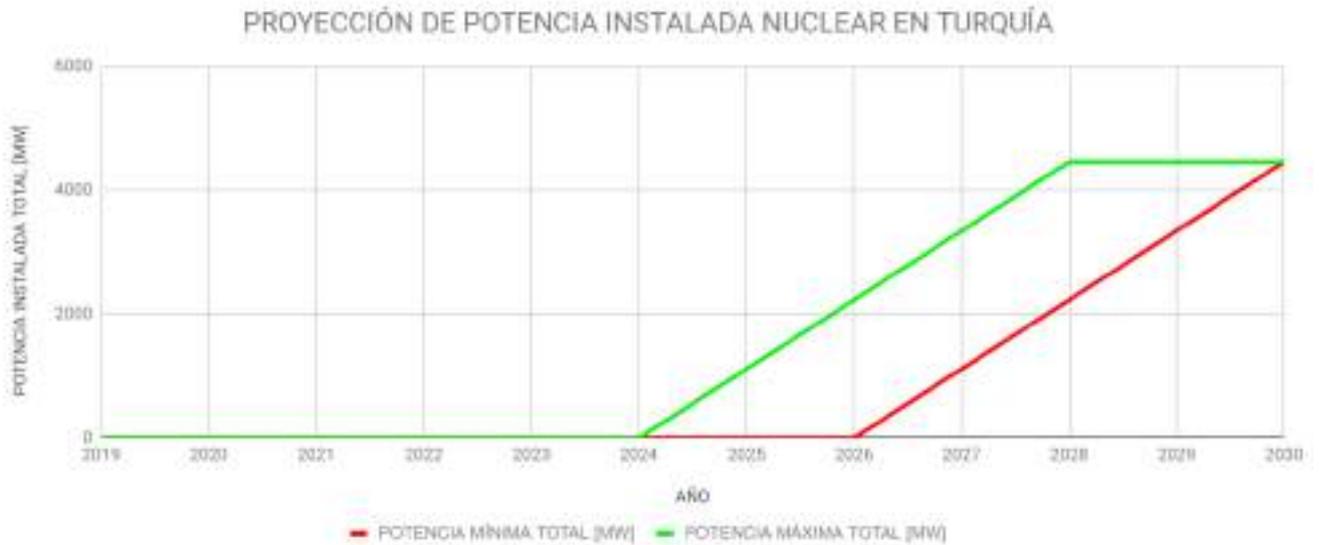


Gráfico N° 51: Proyección de potencia instalada nuclear en Turquía

3.5.4. Emiratos Árabes Unidos



El 27 de diciembre de 2009, la Corporación de Energía Nuclear de Emiratos Árabes (ENEC) anunció que había seleccionado un equipo liderado por la Corporación de Energía Eléctrica de Corea (KEPCO) para diseñar, construir y colaborar en la operación de nuevas plantas de energía nuclear en los Emiratos Árabes Unidos. Actualmente se encuentran en proceso de construcción cuatro unidades nucleares de 1400 MWe brutos cada una, como se muestra en la tabla a continuación.

| Reactor | Tipo | Capacidad MW | Estado | Operador | Proveedor | Inicio de obra |
|-----------|------|--------------|--------------------|----------|-----------|----------------|
| BARAKAH-1 | PWR | 1345 | Under Construction | NAWAH | KEPCO | 2012-07-19 |
| BARAKAH-2 | PWR | 1345 | Under Construction | NAWAH | KEPCO | 2013-04-16 |
| BARAKAH-3 | PWR | 1345 | Under Construction | NAWAH | KEPCO | 2014-09-24 |
| BARAKAH-4 | PWR | 1345 | Under Construction | NAWAH | KEPCO | 2015-07-30 |

Fuente: IAEA - Power Reactor Information System (PRIS)

Tabla N°12: Centrales nucleares en construcción en Emiratos Árabes Unidos

● **PROYECCIÓN DE POTENCIA INSTALADA NUCLEAR**

Proyección de mínima potencia instalada:

- Las centrales en construcción BARAKAH 1-2-3-4 serán puestas en servicio en los años 2022, 2023, 2024, 2025 respectivamente.

Proyección de máxima potencia instalada:

- Las centrales en construcción BARAKAH 1-2-3-4 serán puestas en servicio en los años 2020, 2021, 2022, 2023 respectivamente.

➤ **GRÁFICA DE PROYECCIÓN DE POTENCIA INSTALADA DESDE EL AÑO 2019 HASTA EL AÑO 2030**

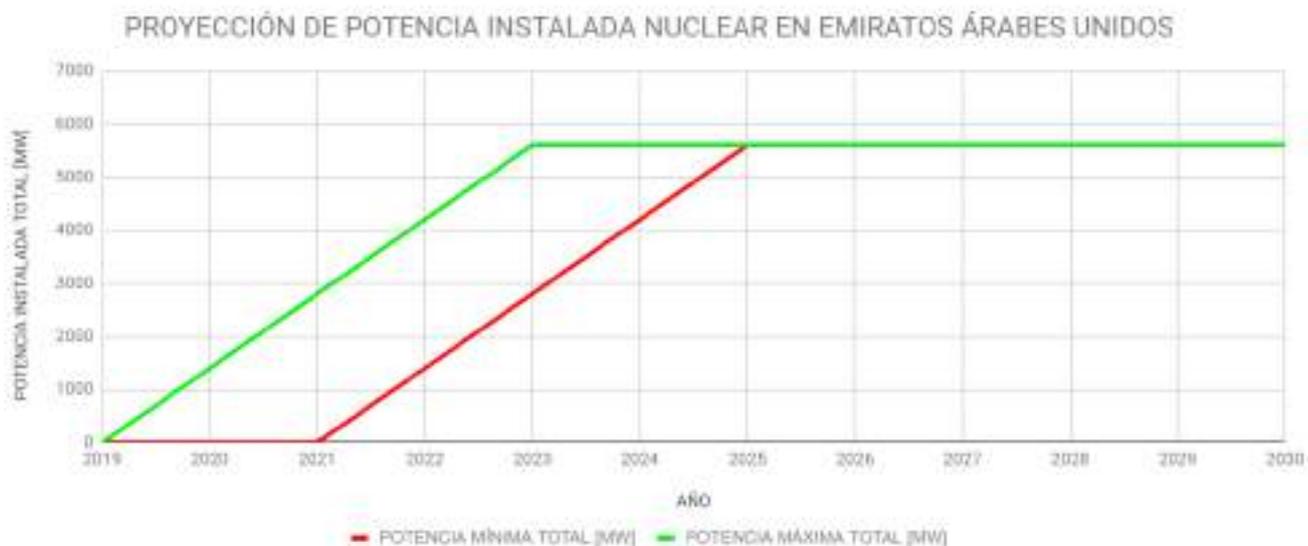


Gráfico N° 52: Proyección de potencia instalada nuclear en Emiratos Árabes Unidos

3.5.5. Egipto

En abril del 2013 el Gobierno de Egipto inició las negociaciones con Rusia para reanudar el acuerdo de cooperación nuclear firmado en 2004 y 2008. Este nuevo acuerdo se centra en la construcción de una central nucleoelectrica en El Dabaa y en el desarrollo conjunto de yacimientos de uranio.

En diciembre de 2015 el Gobierno de Egipto firmó un acuerdo con el Gobierno Ruso para la construcción y operación de cuatro reactores nucleares, incluyendo el suministro de combustible, el manejo del combustible quemado, la capacitación del personal y el desarrollo de un marco regulatorio.

Para mayo de 2016 el Gobierno Egipcio anunció un préstamo de Rusia por 25 mil millones de dólares para cubrir el 85% del costo de cuatro unidades de 1.200 MWe. En diciembre del 2017 se firmaron los comunicados aprobando la firma de contratos para el inicio de construcción.

Las 4 unidades de El Dabaa tendrán una potencia térmica de 3200 MWt. De esos 3200 MW se utilizarán 432 MW para desalinizar agua de mar (mediante destilación de efecto múltiple y ósmosis inversa). Los 2768 MWt restantes de cada unidad serán utilizados para generar energía eléctrica, quedando así 1050 MWe brutos.

| Unidad | Tipo | MWe |
|------------------|-----------------|------------------|
| El Dabaa 1 | VVER-1200/V-529 | 1190/1050 |
| El Dabaa 2 | VVER-1200/V-529 | 1190/1050 |
| El Dabaa 3 | VVER-1200/V-529 | 1190/1050 |
| El Dabaa 4 | VVER-1200/V-529 | 1190/1050 |
| Total (4) | | 4760/4200 |

Tabla N°13: Centrales nucleares planificadas por el Gobierno Egipcio

● PROYECCIÓN DE POTENCIA INSTALADA NUCLEAR

Proyección de mínima potencia instalada:

- Se considera que una de las 4 unidades planificadas se pondrá en servicio en el año 2030.

Proyección de máxima potencia instalada:

- Se considera que una de las 4 unidades planificadas se pondrá en servicio en el año 2028.

➤ GRÁFICA DE PROYECCIÓN DE POTENCIA INSTALADA DESDE EL AÑO 2019 HASTA EL AÑO 2030



Gráfico N° 53: Proyección de potencia instalada nuclear en Egipto

3.5.6. Jordania

Jordania inició el camino de la energía nuclear hace poco más de una década, y en el año 2007 se creó el Comité Jordano de Estrategias Nucleares. Este comité estableció un programa nuclear cuya meta es alcanzar el 30% de la generación nacional con fuentes nucleoelectricas para el 2030.

Desde ese momento, Jordania se encargó de hallar sitios de localización para futuras centrales, y firmó acuerdos con Canadá (2008), Corea (2008) y Rusia (2014), además de considerar diversos proyectos de otros proveedores privados, como la China National Nuclear Corporation (CNNC) o WorleyParsons (Australia). Sin embargo, todos los acuerdos terminaron disolviéndose por diversas razones.

En 2011, el Gobierno de Jordania emitió una especificación de invitación a licitar a tres proveedores potenciales de tecnología nuclear para construir el primer reactor nuclear de Jordania. Sobre la base de un proceso de licitación competitivo, el Gobierno de Jordania seleccionó a la Corporación Estatal de Energía Atómica "Rosatom" como el mejor postor (proveedor de tecnología, inversionista y operador) y firmó el acuerdo de desarrollo del proyecto con RAOS el 22 de septiembre de 2014.

El 24 de marzo de 2015, el Gobierno de Jordania y el Gobierno de la Federación de Rusia firmaron un acuerdo intergubernamental de cooperación para la construcción y operación de la central nuclear.

El proyecto propuesto finalmente estará compuesto por dos reactores de agua a presión basados en el AES-92 ruso (diseño WWER-1000). Este diseño es un reactor avanzado de la Generación III+ con los más altos estándares de seguridad nuclear, con expectativas de inicio de construcción en el año 2023.

● PROYECCIÓN DE POTENCIA INSTALADA NUCLEAR

Proyección de mínima potencia instalada:

- Las 2 centrales planificadas serán puestas en servicio luego del año 2030, con lo cual no se considera una proyección de mínima en el período evaluado.

Proyección de máxima potencia instalada:

- Las 2 centrales planificadas serán puestas en servicio en el año 2029 y 2030 respectivamente.

➤ GRÁFICA DE PROYECCIÓN DE POTENCIA INSTALADA DESDE EL AÑO 2019 HASTA EL AÑO 2030



Gráfico N° 54: Proyección de potencia instalada nuclear en Jordania

4. RESUMEN: ESTADO ACTUAL Y TENDENCIA RESPECTO DE LA ENERGÍA NUCLEAR

En el presente capítulo se procesarán los resultados obtenidos de los análisis previos, para ello se elabora y presenta, en primera instancia, una gráfica de la proyección de potencia instalada nuclear por continente desde el año 2019 hasta el año 2030, en donde se considera el aporte individual de cada país que lo conforma.

Posteriormente se presentan tablas en donde se resumen los aspectos anteriormente analizados, agrupados por continente, en las cuales se incluyen los países que cuentan con centrales nucleares operativas, fuera de servicio y en construcción.

Adicionalmente se consideran en las tablas correspondientes a su continente, los países que se encuentran en etapa de planificación pero que aún no han comenzado la construcción de su primera central nuclear (Egipto y Jordania).

En la última columna de las tablas, denominada “tendencia”, se dispone de una flecha o cruz que representa cualitativamente las intenciones que tienen los distintos países respecto a su futuro en la energía nuclear, según se muestra a continuación:

| | |
|---|--|
|  | El país proyecta un incremento de potencia instalada nuclear en el período 2019-2030. |
|  | El país mantiene su potencia instalada nuclear relativamente estable en el período 2019-2030. |
|  | El país proyecta una disminución de potencia instalada nuclear en el período 2019-2030. |
|  | El país ha sacado de servicio todas sus centrales nucleares de potencia y no planifica nueva generación nuclear en el corto o mediano plazo. |

Tabla N°14: Referencias de esquemas representativos que definen la tendencia

4.1. América

➤ GRÁFICA DE PROYECCIÓN DE POTENCIA INSTALADA NUCLEAR DEL CONTINENTE AMERICANO

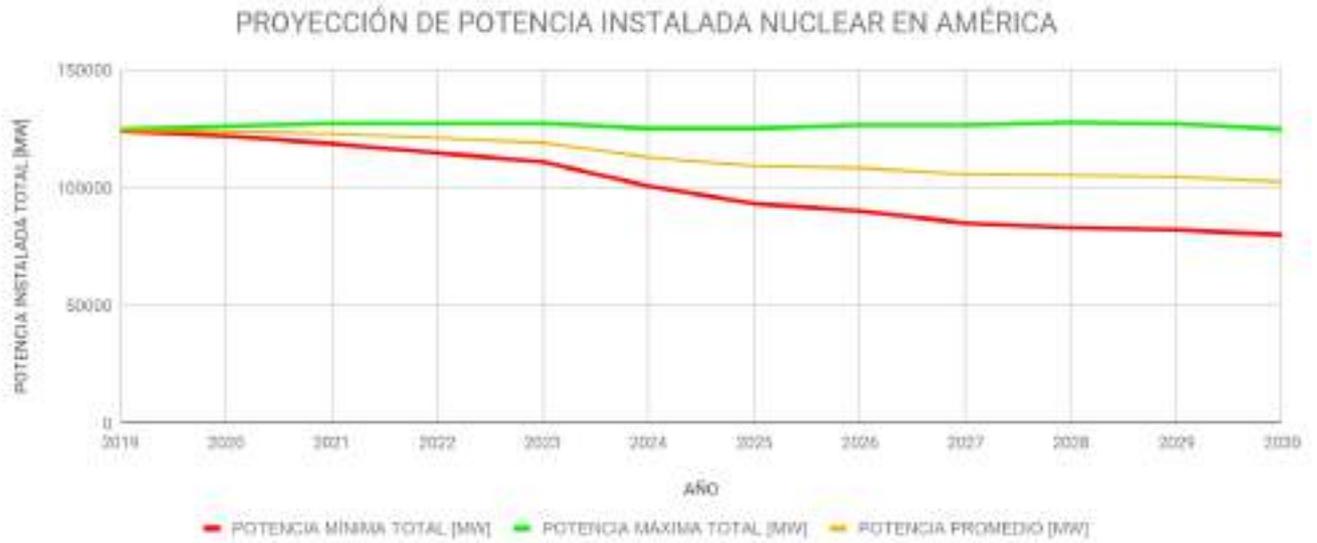


Gráfico N° 55: Proyección de potencia instalada nuclear en América

➤ TABLA RESUMEN POR PAÍS DEL CONTINENTE AMERICANO

| | PAÍS | REACTORES OPERATIVOS | PARTICIPACIÓN NUCLEAR | FUERA DE SERVICIO | EN CONSTRUCCIÓN | TENDENCIA |
|----------------------|-----------|----------------------|-----------------------|-------------------|-----------------|-----------|
| 1 | Argentina | 3 | 5% | 0 | 1 | |
| 2 | Brasil | 2 | 3% | 0 | 1 | |
| 3 | México | 2 | 5% | 0 | 0 | |
| 4 | EE.UU | 98 | 20% | 35 | 2 | |
| 5 | Canadá | 19 | 15% | 6 | 0 | |
| TOTAL América | | 124 | - | 41 | 4 | |

Tabla N°15: Resumen de proyección de potencia instalada nuclear del continente americano

4.2. Europa

➤ GRÁFICA DE PROYECCIÓN DE POTENCIA INSTALADA NUCLEAR DEL CONTINENTE EUROPEO

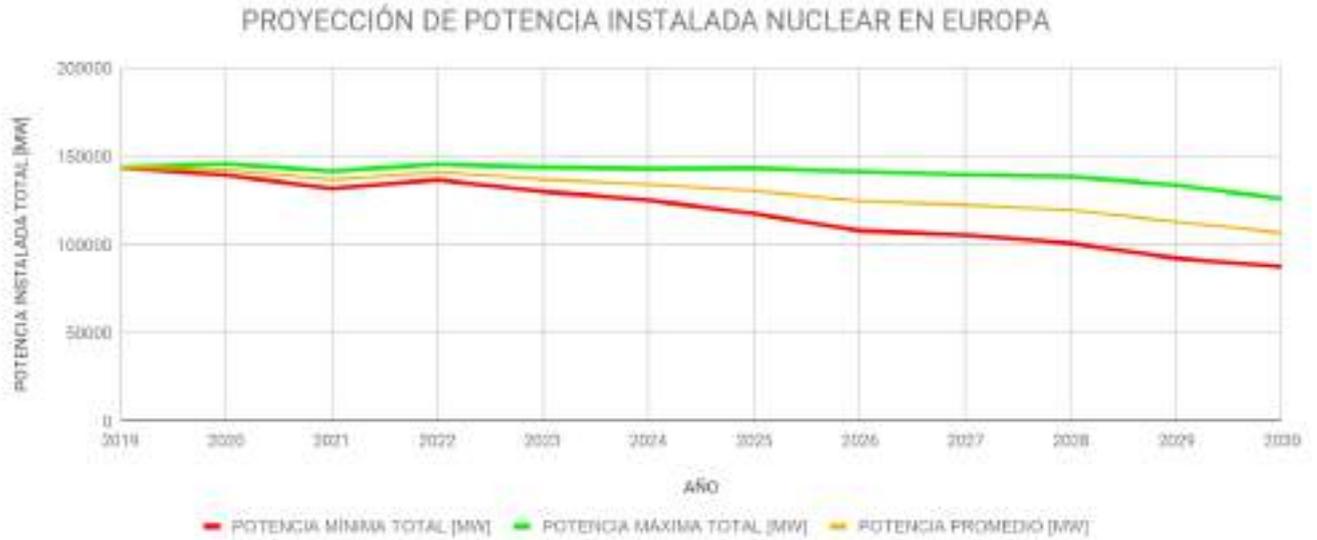


Gráfico N° 56: Proyección de potencia instalada nuclear en Europa

➤ TABLA RESUMEN POR PAÍS DEL CONTINENTE EUROPEO

| | PAÍS | REACTORES OPERATIVOS | PARTICIPACIÓN NUCLEAR | FUERA DE SERVICIO | EN CONSTRUCCIÓN | TENDENCIA |
|---------------------|-------------|----------------------|-----------------------|-------------------|-----------------|-----------|
| 1 | Bélgica | 7 | 39% | 1 | 0 | |
| 2 | Bulgaria | 2 | 34% | 4 | 0 | |
| 3 | Rep. Checa | 6 | 34% | 0 | 0 | |
| 4 | Finlandia | 4 | 33% | 0 | 1 | |
| 5 | Francia | 58 | 72% | 12 | 1 | |
| 6 | Alemania | 7 | 12% | 29 | 0 | |
| 7 | Hungría | 4 | 50% | 0 | 0 | |
| 8 | Italia | 0 | 0% | 4 | 0 | X |
| 9 | Lituania | 0 | 0% | 2 | 0 | X |
| 10 | Holanda | 1 | 3% | 2 | 0 | |
| 11 | Rumania | 2 | 17% | 0 | 0 | |
| 12 | Eslovaquia | 4 | 55% | 3 | 2 | |
| 13 | Eslovenia | 1 | 36% | 0 | 0 | |
| 14 | España | 7 | 20% | 3 | 0 | |
| 15 | Suecia | 8 | 40% | 5 | 0 | |
| 16 | Suiza | 5 | 38% | 1 | 0 | |
| 17 | Ucrania | 15 | 53% | 4 | 2 | |
| 18 | Reino Unido | 15 | 18% | 30 | 1 | |
| 19 | Bielorrusia | 0 | 0% | 0 | 2 | |
| TOTAL Europa | | 146 | - | 100 | 9 | |

Tabla N°16: Resumen de proyección de potencia instalada nuclear del continente europeo

4.3. Asia

➤ GRÁFICA DE PROYECCIÓN DE POTENCIA INSTALADA NUCLEAR DEL CONTINENTE ASIÁTICO

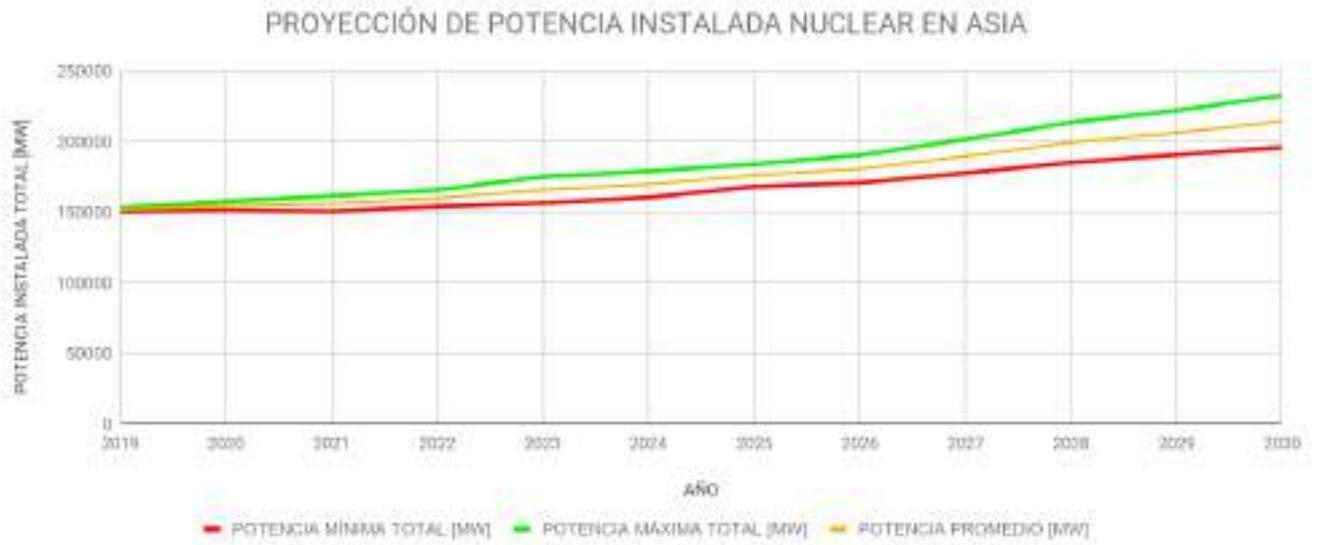


Gráfico N° 57: Proyección de potencia instalada nuclear en Asia

➤ TABLA RESUMEN POR PAÍS DEL CONTINENTE ASIÁTICO

| | PAÍS | REACTORES OPERATIVOS | PARTICIPACIÓN NUCLEAR | FUERA DE SERVICIO | EN CONSTRUCCIÓN | TENDENCIA |
|-------------------|------------------|----------------------|-----------------------|-------------------|-----------------|---|
| 1 | Armenia | 1 | 26% | 1 | 0 |  |
| 2 | China + Taiwan | 51 | 5% | 0 | 11 |  |
| 3 | India | 22 | 3% | 0 | 7 |  |
| 4 | Irán | 1 | 2% | 0 | 0 |  |
| 5 | Japón | 39 | 6% | 21 | 2 |  |
| 6 | Kazajistán | 0 | 0% | 1 | 0 | X |
| 7 | Pakistán | 5 | 7% | 0 | 2 |  |
| 8 | Rusia | 35 | 18% | 8 | 6 |  |
| 9 | Rep. de Corea | 24 | 24% | 1 | 5 |  |
| 10 | Bangladesh | 0 | 0% | 0 | 2 |  |
| 11 | Turquía | 0 | 0% | 0 | 1 |  |
| 12 | E. Árabes Unidos | 0 | 0% | 0 | 4 |  |
| 13 | Jordania | 0 | 0% | 0 | 0 |  |
| TOTAL Asia | | 178 | - | 32 | 42 |  |

Tabla N°17: Proyección de potencia instalada nuclear en el continente asiático

4.4. África

➤ GRÁFICA DE PROYECCIÓN DE POTENCIA INSTALADA NUCLEAR DEL CONTINENTE AFRICANO



Gráfico N° 58: Proyección de potencia instalada nuclear en África

➤ TABLA RESUMEN POR PAÍS CONTINENTE AFRICANO

| | PAÍS | REACTORES OPERATIVOS | PARTICIPACIÓN NUCLEAR | FUERA DE SERVICIO | EN CONSTRUCCIÓN | TENDENCIA |
|---|---------------------|----------------------|-----------------------|-------------------|-----------------|-----------|
| 1 | Sudáfrica | 2 | 5% | 0 | 0 | → |
| 2 | Egipto | 0 | 0% | 0 | 0 | ↗ |
| | TOTAL África | 2 | - | 0 | 0 | ↗ |

Tabla N°18: Proyección de potencia instalada nuclear en el continente africano

4.5. Proyección de energía nuclear mundial

➤ GRÁFICA DE PROYECCIÓN DE POTENCIA INSTALADA NUCLEAR MUNDIAL

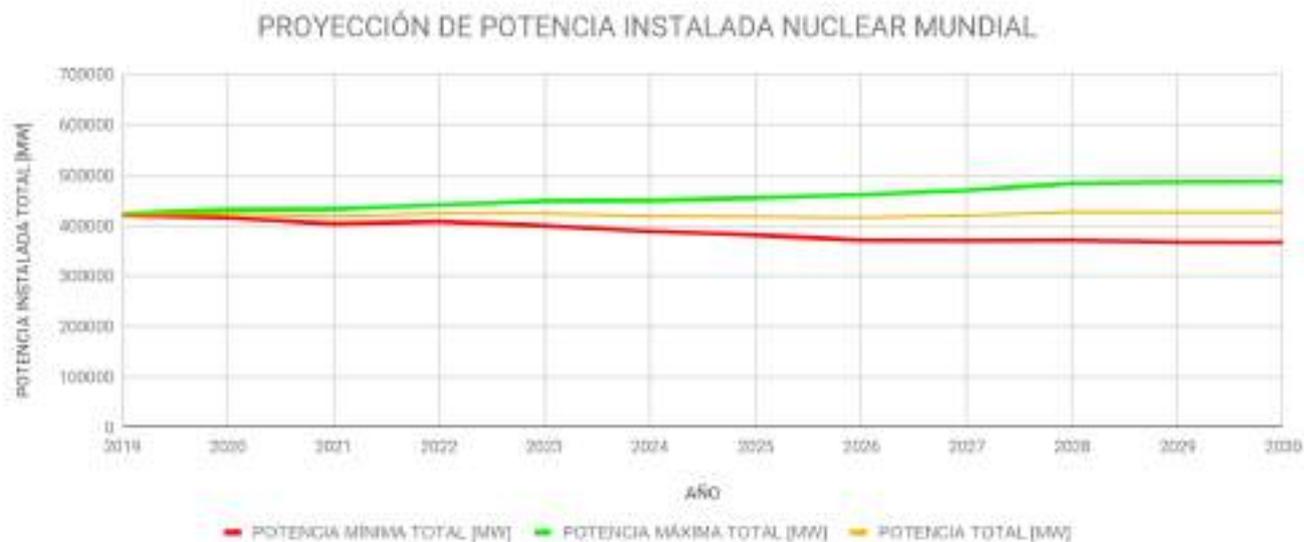


Gráfico N° 59: Proyección de potencia instalada nuclear en el mundo

4.6. Comparación de resultados obtenidos en la Tesis con los proyectados por OIEA e IEA

Con el objeto de validar el análisis desarrollado y los resultados obtenidos en la presente Tesis, a continuación se realizará una comparación de los mismos con las proyecciones de potencia instalada nuclear al año 2030 realizadas por el Organismo Internacional de Energía Atómica y por la Agencia Internacional de Energía.

4.6.1. Proyección de potencia instalada nuclear por OIEA

Las proyecciones realizadas por la OIEA se basan en una revisión crítica de la situación energética a nivel global y regional realizadas por otros organismos internacionales. Esa información luego es contrastada con las proyecciones nacionales proporcionadas por países individuales y con las estimaciones del grupo de expertos que participan en la consultoría anual del OIEA, sobre proyecciones de capacidad nuclear. [12]

Para llevar a cabo la proyección, un grupo de expertos consideran todos los reactores operativos, las posibles licencias de renovación de centrales, las paradas planificadas y la construcción de proyectos previstos para las próximas décadas. Los expertos construyen las estimaciones realizando en primer lugar una proyección de mínima y luego una de máxima potencia nuclear instalada.

Respecto a la proyección de mínima, los expertos de OIEA estiman que se retirarán de servicio alrededor de 139 GW de capacidad nuclear y se instalarán 99 GW de nueva potencia nuclear hasta el año 2030.

La proyección de máxima arrojó como resultado que se retirarán de servicio alrededor de 55 GW de capacidad nuclear y se instalarán 207 GW de nueva potencia nuclear hasta el año 2030.

A continuación se presentan los resultados:

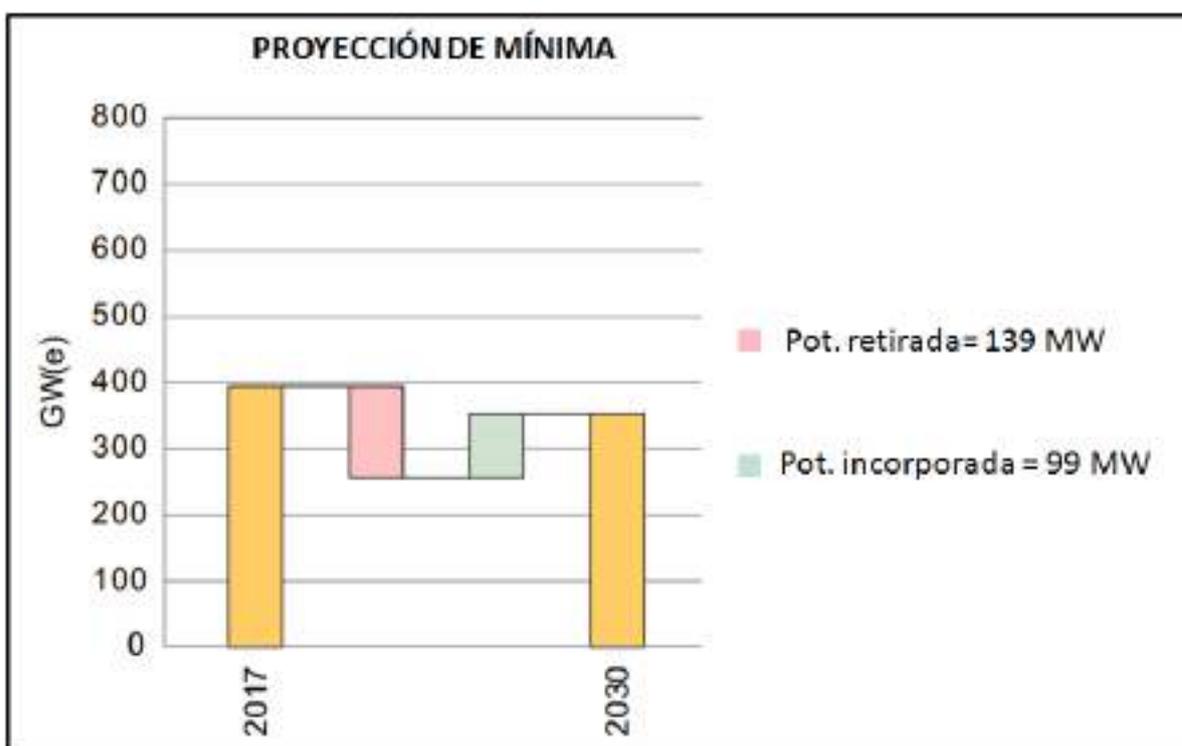


Gráfico N° 60: Proyección de mínima potencia instalada nuclear realizada por OIEA

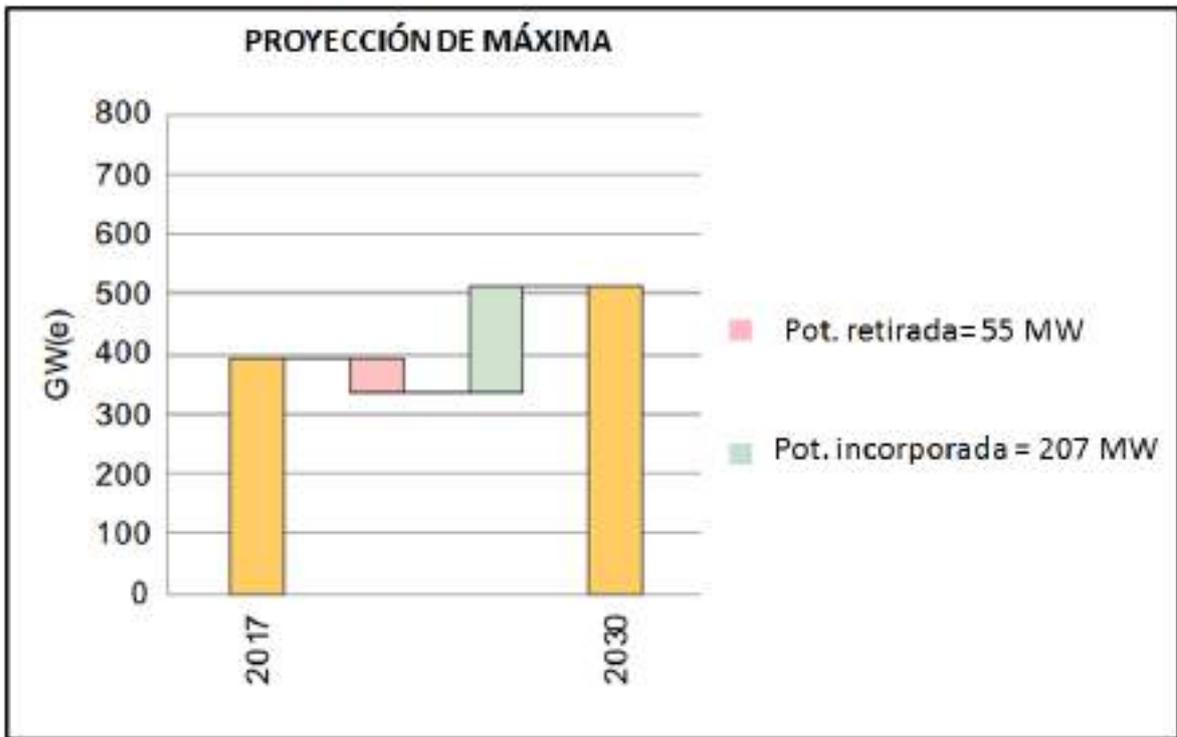


Gráfico N° 61: Proyección de máxima potencia instalada nuclear realizada por OIEA



Gráfico N° 62: Proyección de mínima y máxima potencia instalada nuclear realizada por OIEA

4.6.2. Proyección de potencia instalada nuclear por IEA

Las proyecciones realizadas por la Agencia Internacional de Energía se basan en los “Nuevos Escenarios Políticos” (NPS), en donde se contemplan todas las políticas gubernamentales que ya están vigentes, así como las que se han anunciado por cada país.

La Agencia Internacional de Energía presenta su resultado en una gráfica en donde se promedia la situación de mínima y máxima. El resultado de la IEA en base a los nuevos escenarios políticos arroja una potencia instalada nuclear para el año 2030 de 460 GW. [13]

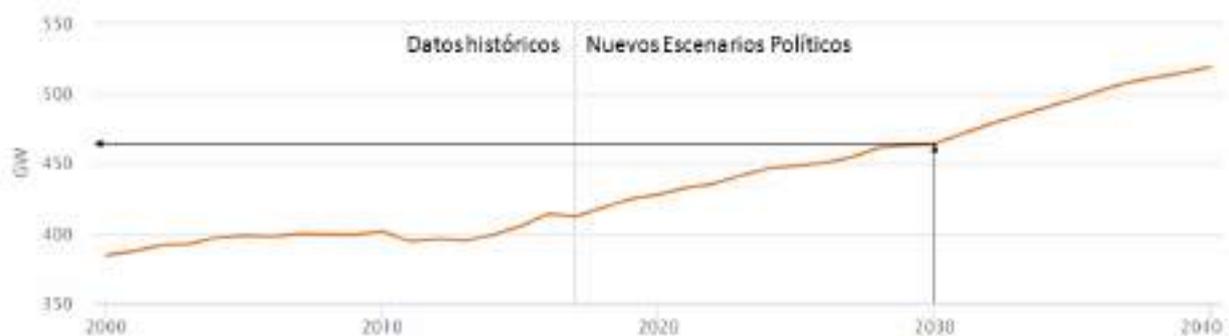


Gráfico N° 63: Proyección de potencia instalada nuclear al año 2030 realizada por IEA

4.6.3. Comparación de resultados obtenidos

A continuación se compararán los resultados obtenidos del análisis de la proyección de potencia instalada nuclear de la presente Tesis, con los obtenidos por las agencias internacionales OIEA y IEA.

La proyección obtenida de la presente tesis para el año 2030, arroja los siguientes resultados:

- Proyección de mínima: 366 GW
- Proyección de máxima: 486 GW

En el gráfico incluido a continuación, se presenta la potencia instalada nuclear actual (2019) y las proyecciones de la presente Tesis, de OIEA y la proyección realizada por la IEA para el año 2030.

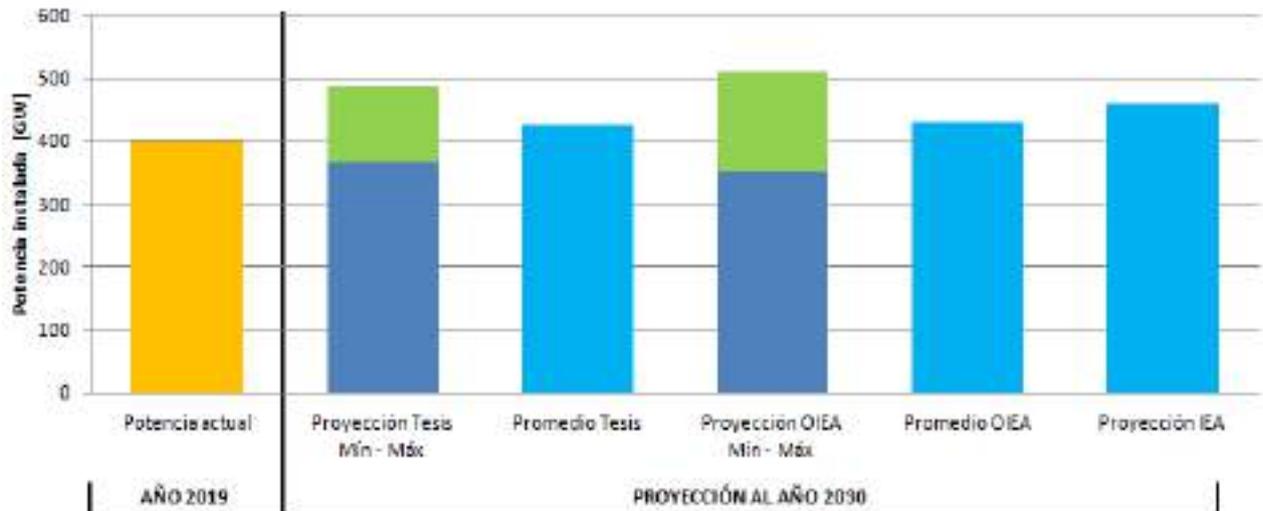


Gráfico N° 64: Comparación de proyecciones de la presente Tesis con OIEA y con IEA

Para realizar una correcta comparación se presenta una gráfica con los promedios de mínima y máxima tanto de la Tesis como de la OIEA, junto con la proyección realizada por la IEA.

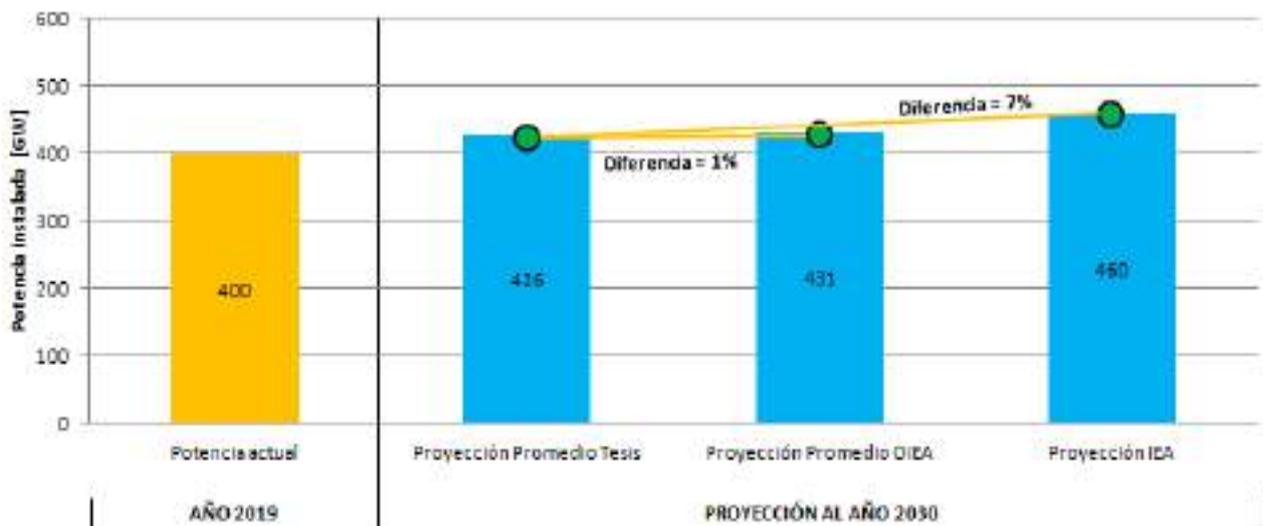


Gráfico N° 65: Diferencia entre la proyección de la presente Tesis con OIEA y con IEA

De la comparación realizada se observa que la potencia estimada promedio obtenida en la presente Tesis tiene un 1% de diferencia respecto del promedio proyectado por OIEA. Esto evidencia que los cálculos y estimaciones realizadas en la Tesis son consecuentes con el Organismo Internacional. Además, se destaca el hecho que el margen entre máximo y mínimo respecto de la media, es un 25% menor en la presente Tesis que en las estimaciones de OIEA.

El resultado obtenido por la IEA es un 7% superior al obtenido en la Tesis. Esto puede deberse a que la IEA supone que todos los países seguirán al pie de la letra sus políticas energéticas, con lo cual se puede suponer que esa es una “estimación de máxima”.

La proyección realizada en la presente Tesis, al igual que la proyectada por OIEA, arroja resultados más conservadores respecto del futuro de la energía nuclear, dado que suponen que no todas las planificación se llevarán a cabo en tiempo y forma, sino que pueden sufrir demoras o cancelaciones.

5. FUNCIONAMIENTO GENERAL DE UNA CENTRAL NUCLEAR

5.1. Introducción

Las centrales nucleares de potencia tienen como objetivo principal generar energía eléctrica. Su funcionamiento es similar al de una central térmica convencional con combustible fósil, pero difiere en la manera de producir calor para evaporar el agua: las nucleares generan calor mediante la fisión del combustible nuclear y las térmicas mediante la combustión de un combustible fósil.

A continuación se presentan dos esquemas comparativos: el primero es de una central térmica y el segundo es de una central nuclear.

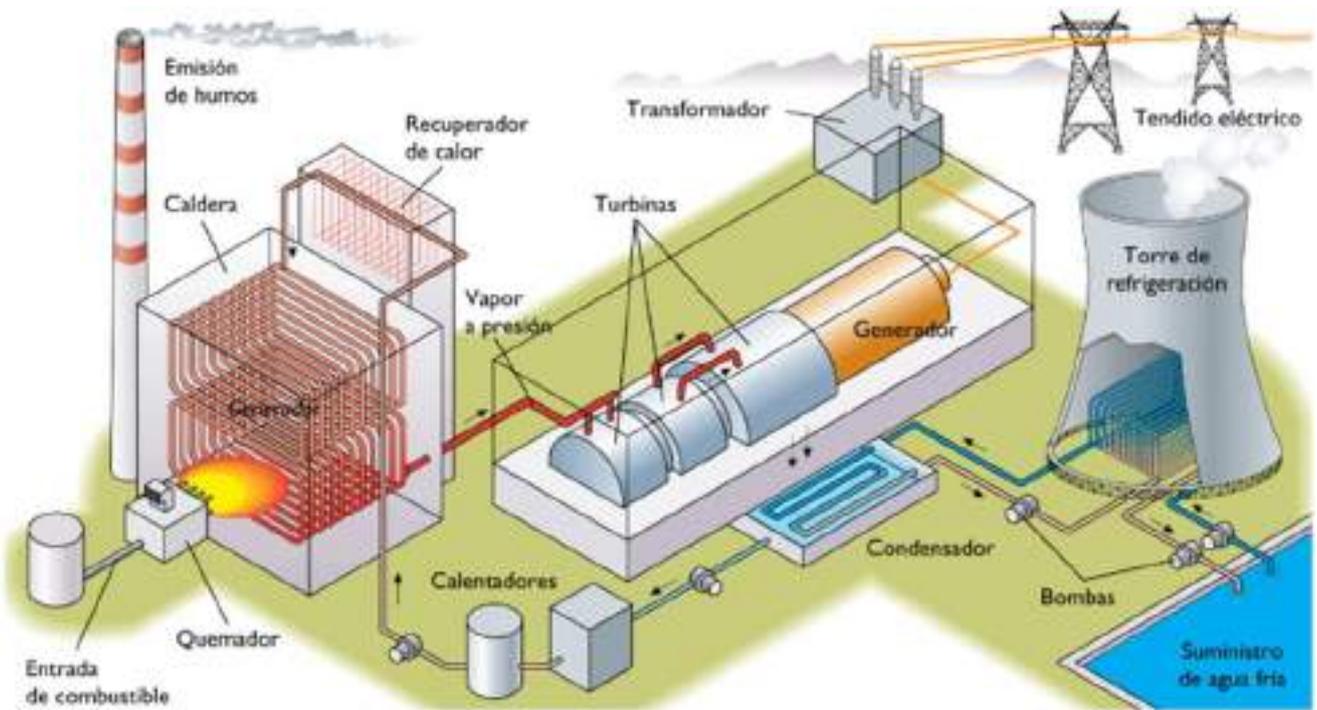


Figura N°6: Esquema de una central térmica convencional

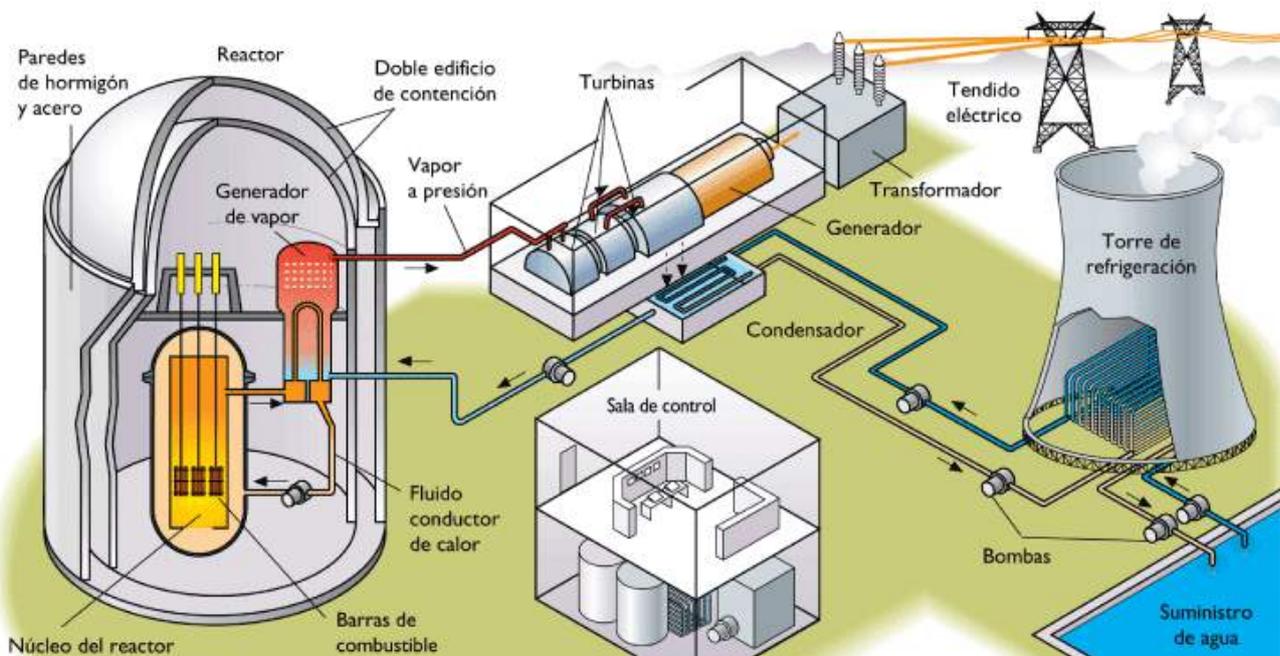


Figura N°7: Esquema de una central nuclear convencional

Como se mencionó, existen distintos diseños de reactores nucleares. A continuación se describe conceptualmente el funcionamiento general de una central nuclear, sin identificar las diferencias entre las tecnologías existentes, dado que esto se abordará en el punto 5.4 de la presente Tesis.

5.2. Circuito primario

El circuito primario de la mayoría de las centrales nucleares, está compuesto por el reactor, los generadores de vapor, las bombas principales, el presurizador, circuitos auxiliares y circuitos de seguridad.

En el reactor se encuentran los combustibles nucleares (núcleo) compuestos generalmente por uranio natural, uranio enriquecido, o mezclas de uranio-plutonio, dependiendo del tipo de reactor nuclear. Lo que se busca en todos los casos es generar la fisión de los átomos del combustible nuclear, los cuales liberan gran cantidad de calor.

El núcleo del reactor en general está sumergido en agua en estado líquido (refrigerante), la cual se calienta como consecuencia de estar en contacto con los combustibles nucleares. El refrigerante circula impulsado por las bombas principales desde el núcleo del reactor hacia los generadores de vapor, en donde se transfiere el calor extraído de los combustibles hacia al circuito secundario, para luego regresar al núcleo cerrando así el circuito. La función del presurizador es regular la presión y el nivel del refrigerante.

A continuación se muestran dos imágenes: la primera corresponde a un corte del recipiente de presión de Atucha II y la segunda muestra el interior del edificio del reactor con los principales equipos del circuito primario de la central Atucha I.

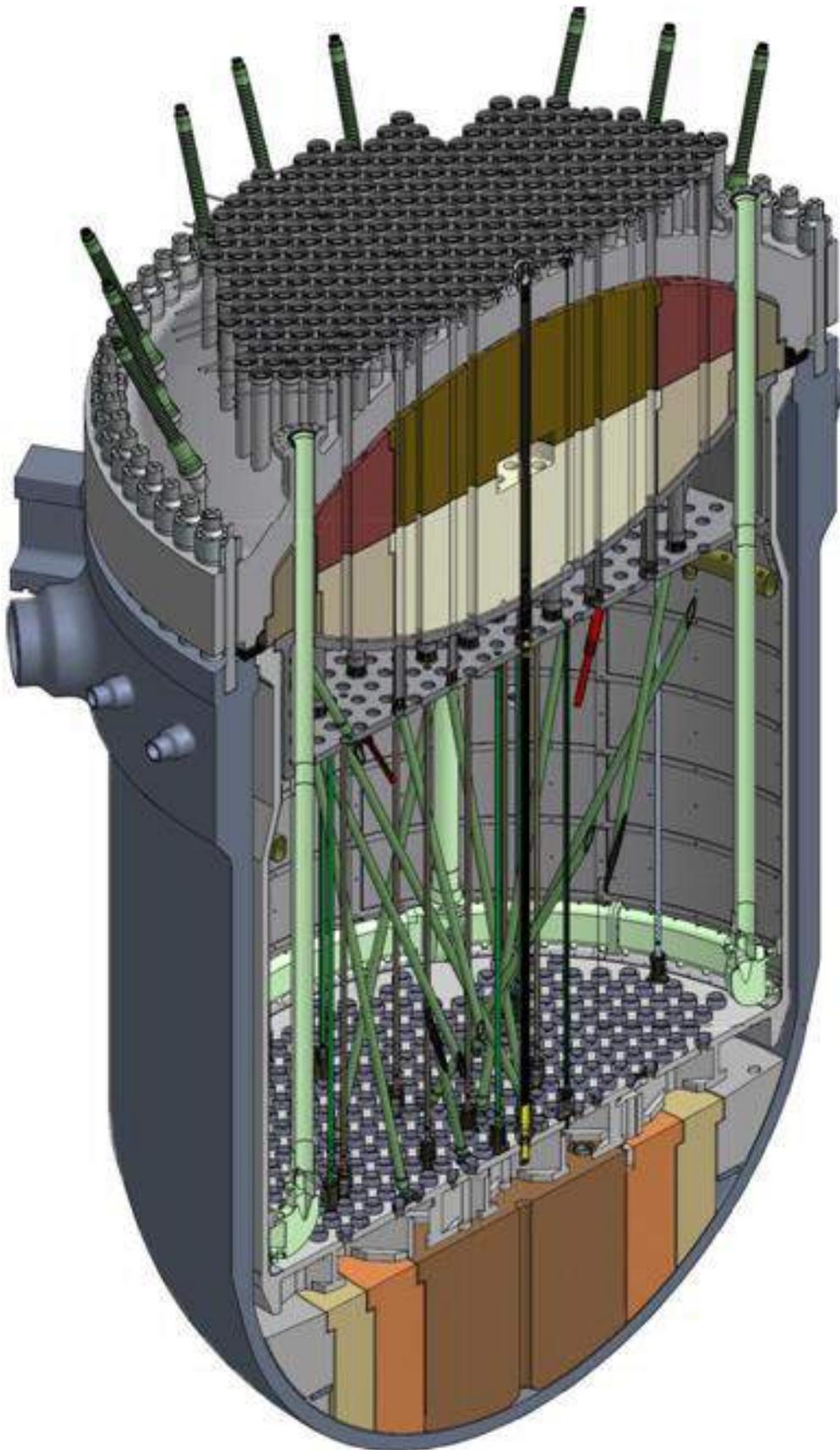


Figura N°8: Corte del recipiente de presión de Atucha II

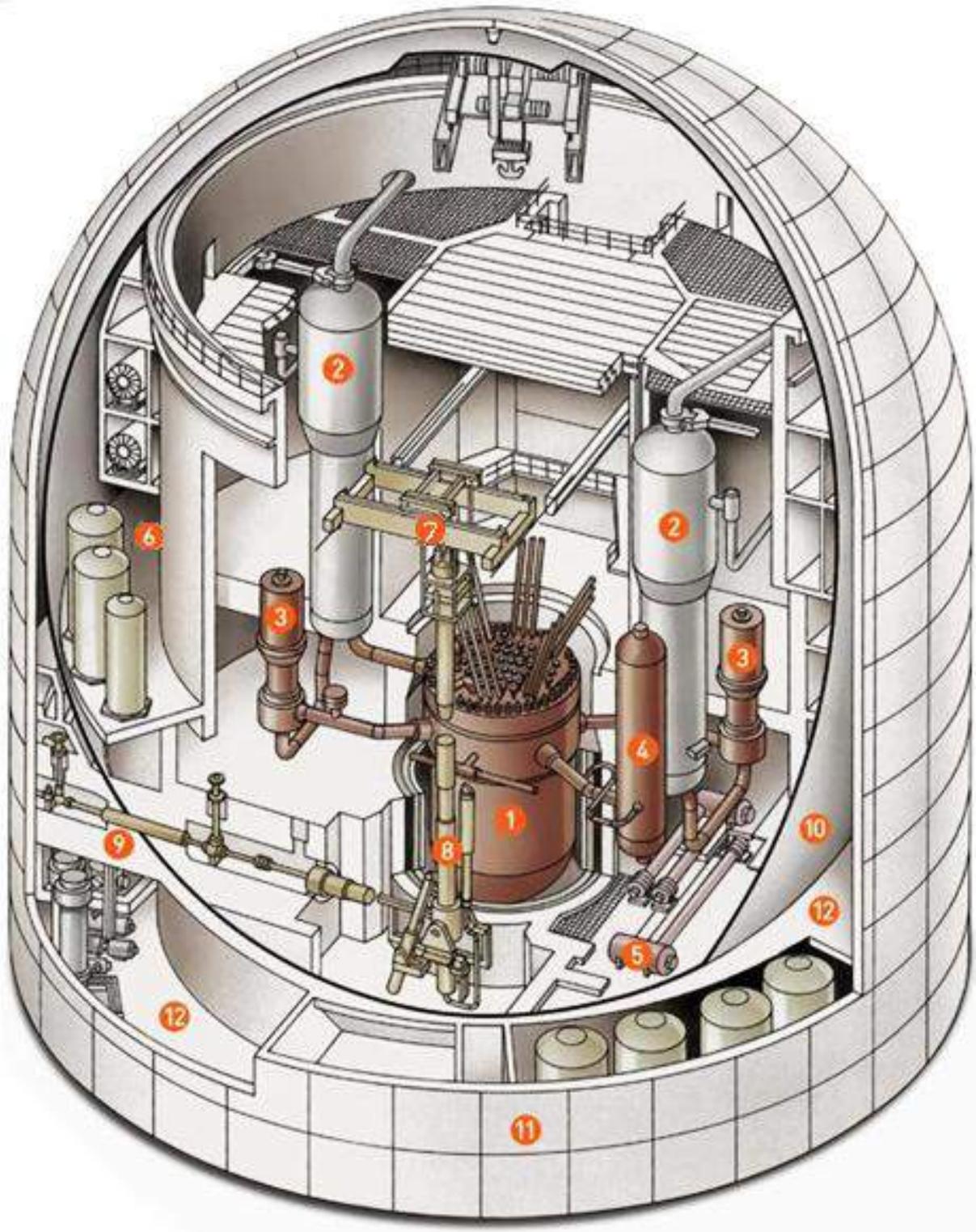


Figura N°9: Edificio del reactor de la Central Nuclear Atucha I

- | | | | |
|--------------------------|--------------------------|-----------------------|--------------------|
| 1- Recipiente de presión | 2-Generador de vapor | 3- Bombas principal | 4- Presurizador |
| 5- Moderador | 6- Sistema de seguridad | 7-Máquina de recambio | 8- Botella |
| 9-Tubo transferencia | 10- Esfera de contención | 11- Edificio reactor | 12- Recinto anular |

5.3. Circuito secundario

La mayoría de las centrales nucleares cuentan con generadores de vapor, los cuales vinculan el circuito primario con el circuito secundario. El refrigerante del circuito primario circula por la parte interior de los tubos de los generadores de vapor, y por la carcasa de éstos (fuera de los tubos), circula el agua del circuito secundario. Existe una transferencia de energía desde el circuito primario hacia el circuito secundario, pero no hay transferencia ni mezcla de fluidos entre ambos circuitos.

Cuando el agua del circuito secundario recibe calor en los generadores de vapor, comienza a aumentar su temperatura hasta un cierto valor de equilibrio en donde se produce vapor. Éste vapor generado es enviado al turbogruppo, allí se expande transfiriendo su energía cinética a la turbina, la cual se convierte en energía mecánica de rotación. La turbina está montada sobre un eje común con un generador eléctrico, por lo tanto al girar la turbina también lo hace el generador, produciendo de esta manera energía eléctrica. Esa energía luego es tomada por transformadores quienes le elevan la tensión para ser inyectada a las redes de transporte.

El vapor que sale de la turbina es condensado en un gran equipo condensador mediante una corriente de agua fría, la cual puede estar suministrada en su totalidad por una fuente fría (río, lago, mar) o puede ser enfriada por una torre de enfriamiento con un suministro de agua menor.

A la salida del condensador, el agua condensada es precalentada en intercambiadores de calor mediante extracciones de vapor de la turbina y finalmente es transportada por bombas de condensado nuevamente hacia los generadores de vapor, cerrando así el circuito secundario.

A continuación se presentan imágenes del turbogruppo de la Central Nuclear Atucha II, el cual genera 745 MW eléctricos de potencia, siendo la máquina de mayor potencia unitaria del Sistema Interconectado Nacional (SIN), posición que ocupaba previamente la Central Nuclear de Embalse con 648 MWe.



Figura N°10: Montaje del turbogruppo de Atucha II

5.4. Tipos de centrales nucleares

Los reactores nucleares han transitado diferentes etapas tecnológicas: desde centrales que generaban unos pocos MWe hasta centrales que en la actualidad pueden alcanzar potencias superiores a los 1700 MWe.

Las distintas tecnologías de reactores nucleares pueden diferenciarse por varios aspectos: refrigerante (agua pesada, agua liviana, gas, metal fundido), estado de agregación del refrigerante (líquido, gas o mezcla), combustible (uranio natural, uranio enriquecido, mezclas de uranio-plutonio, torio), estructura del combustible (cerámico o metálico), moderador (grafito, agua, agua pesada, ausencia de moderador), velocidad de neutrones (lentos o rápidos), etc.

A continuación se muestra un esquema en donde se representan los tipos de reactores nucleares agrupados en 6 tecnologías, bajo un criterio de diferenciación por el tipo de refrigerante utilizado.

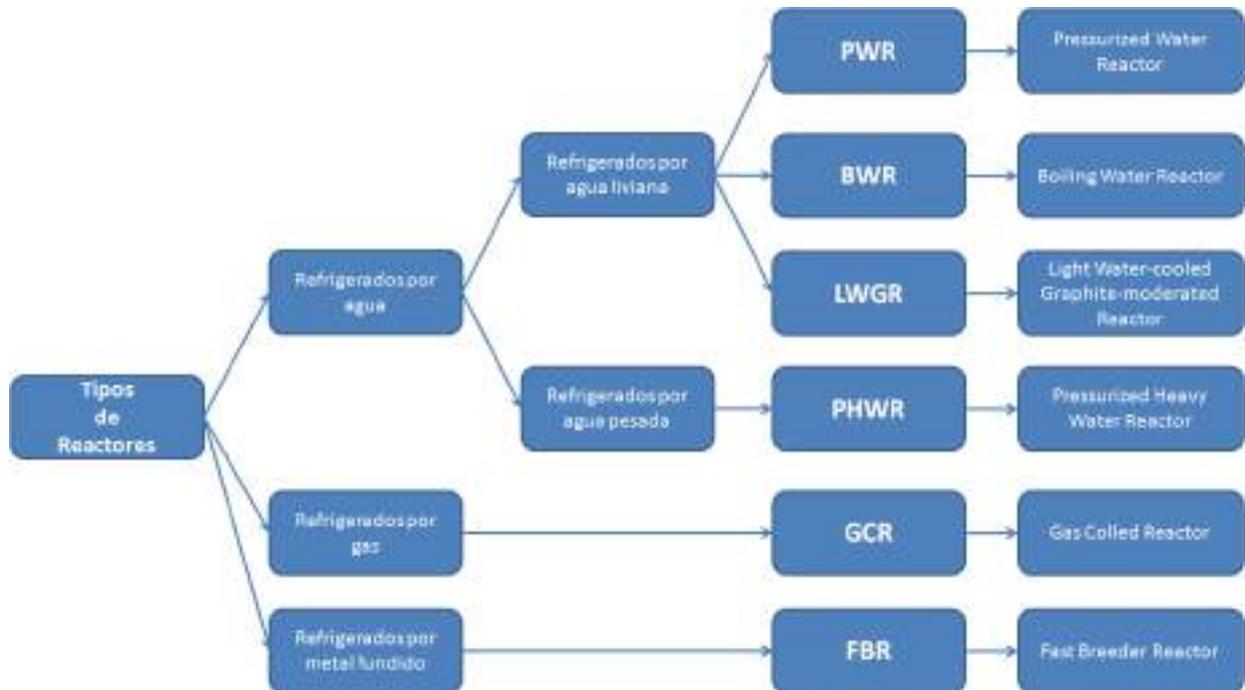


Figura N°11: Principales tecnologías de generación nuclear [Elaboración propia]

5.4.1. Descripción conceptual de cada tecnología

- **PWR (Pressurized Water Reactor)**

La tecnología PWR es la más empleada en el mundo, con más de 300 reactores nucleares en operación para la generación de energía y varios cientos empleados para la propulsión naval.

Los reactores PWR utilizan agua liviana como refrigerante y moderador. El diseño se distingue por tener combustibles nucleares con uranio enriquecido, un circuito de agua de enfriamiento primario, la cual fluye en estado líquido a través del núcleo del reactor a alta presión, y un circuito secundario independiente en el que se genera vapor para impulsar la turbina.

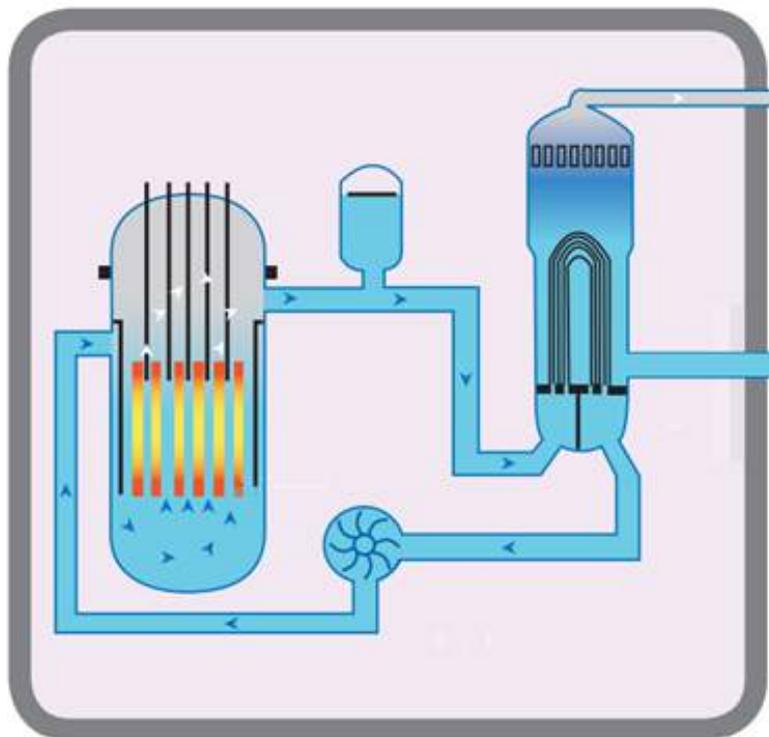


Figura N°12: Esquema de un reactor de tipo PWR

El agua del circuito primario alcanza aproximadamente los 325 °C, por lo tanto para que se mantenga en estado líquido, debe circular a una presión de aproximadamente 150 veces la presión atmosférica. Dicha presión es controlada por un equipo presurizador, el cual tiene un “colchón” de vapor que permite regular la presión mediante un sistema de duchas y calefacciones. Para que circule el agua a través del núcleo del reactor se utilizan bombas de gran potencia, y una vez que el agua abandona el reactor, es derivada a unos intercambiadores de calor para transferir la energía extraída del núcleo hacia un circuito secundario.

El circuito secundario trabaja a menos presión que el circuito primario dado que en este caso el objetivo es lograr una ebullición. El agua hierve en los intercambiadores de calor que, por lo tanto, son denominados generadores de vapor. El vapor impulsa una gran turbina la cual está acoplada a un generador para producir electricidad, luego el vapor es enfriado, condensado y devuelto a los generadores de vapor, donde nuevamente se calienta y evapora por intercambio de calor con el circuito primario.

El circuito secundario en todos los reactores nucleares es un ciclo típico de una turbina de vapor convencional, pero con el agregado de algunos sistemas de seguridad, dado que alteraciones importantes en la presión del circuito secundario, puede generar oscilaciones de temperatura en el circuito primario.

- **BWR (Boiling Water Reactor)**

Este diseño tiene muchas similitudes con el PWR, excepto que hay un circuito único de agua que actúa tanto como refrigerante/moderador y como impulsor del turbogrupos.

Por este motivo se trabaja con agua a la mitad de presión que en los reactores PWR (unas 75 veces la presión atmosférica), de modo que ésta hierve en el núcleo a aproximadamente 285 °C. El reactor está diseñado para operar con un 12-15% de vapor en la parte superior del núcleo, lo cual genera mayor eficiencia dado que no hay generadores de vapor independientes ni intercambio de calor con un circuito secundario.

El vapor generado en el núcleo pasa a través de unas placas separadoras de líquido ubicadas en la parte superior del mismo y luego el vapor seco se dirige directamente a las turbinas. Dado que el agua del turbogrupos es la misma que refrigera el reactor, la turbina debe estar controlada y debe proporcionarse protección radiológica durante el mantenimiento. Debido a esto, el costo de operación de los reactores BWR tiende a equilibrar el ahorro debido al diseño más simple y la mayor eficiencia.

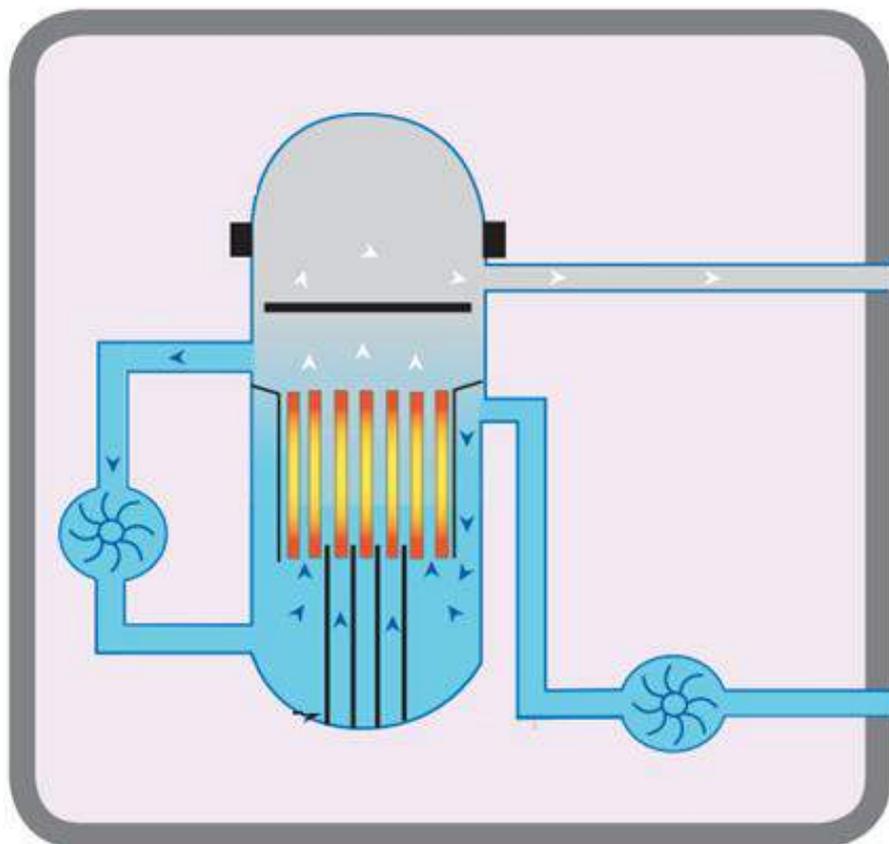


Figura N°13: Esquema de un reactor de tipo BWR

- **LWGR (Light Water-Cooled Graphite-Moderated Reactor)**

El reactor LWGR, también denominado RBMK (reactor de canal de alta potencia), es un diseño soviético utilizado (entre otras) por la Central Nuclear de Chernobyl. Es muy diferente de la mayoría de los otros diseños de reactores de potencia, ya que fue diseñado y utilizado por la Unión Soviética tanto para la generación de energía eléctrica como para la producción de plutonio.

Estos reactores se enfrían con agua liviana la cual hierve en el núcleo a 290 °C. El vapor luego es derivado al turbogruppo, al igual que en los reactores de tipo BWR. Como moderador utilizan grafito.

La combinación de moderador de grafito y refrigerante de agua no se encuentra en ningún otro reactor de potencia en el mundo. Como mostró el accidente de Chernobyl, varias de las características de diseño del LWGR, en particular, el diseño de las barras de control y un coeficiente de vacío positivo, no eran seguros.

Después del accidente de Chernobyl, se hicieron varios cambios significativos en el diseño para abordar estos problemas, de todas maneras nunca se ha construido un reactor de tipo LWGR fuera de la Unión Soviética.

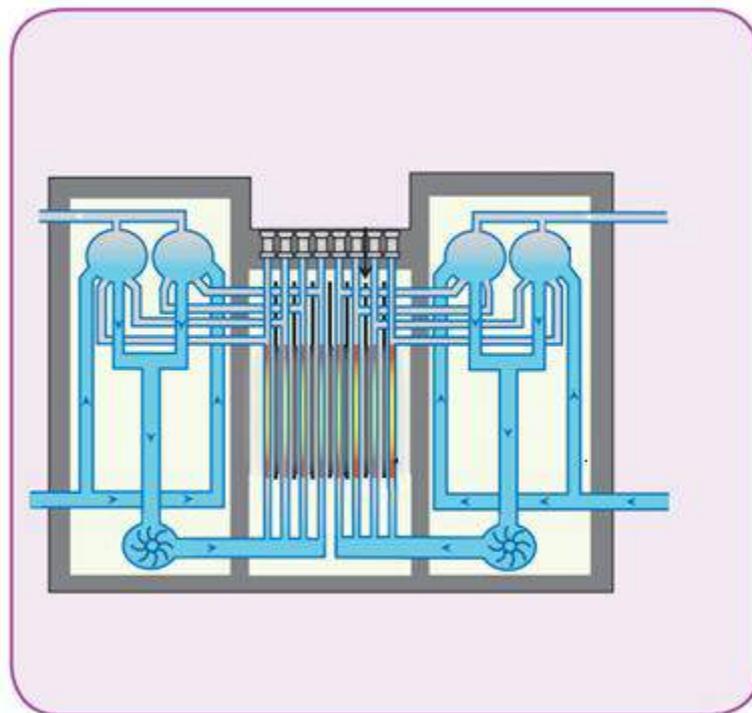


Figura N°14: Esquema de un reactor de tipo LWGR

- **PHWR (Pressurized Heavy Water Reactor)**

El diseño del reactor PHWR se ha desarrollado en la década de 1950 en Canadá con el nombre CANDU (Canada Deuterium-Uranium Reactor). Hoy en día existen dos versiones de reactores PHWR: los de tipo CANDU con 47 unidades operativas y los de tipo Atucha con sólo dos unidades operativas en el mundo, ubicadas en la República Argentina (Atucha I y Atucha II).

Los reactores de tipo PHWR generalmente utilizan uranio natural como combustible, por ese motivo necesitan un moderador más eficiente, en este caso agua pesada (D_2O). Si bien estos reactores tienen un bajo costo de combustible por utilizar uranio natural (sin enriquecer), compensan ese “ahorro” con la costosa y compleja fabricación de agua pesada.

En el diseño CANDU, el moderador se encuentra en un gran tanque penetrado por cientos de tubos de presión horizontales en donde se encuentran los combustibles, los cuales son enfriados por un flujo de agua pesada a alta presión (aproximadamente 100 veces la presión atmosférica y a 290 °C). Al igual que en el PWR, el refrigerante primario intercambia calor con un circuito secundario en donde se genera vapor para impulsar las turbinas.

Los reactores PHWR pueden aceptar uranio reciclado de los combustibles quemados en los reactores de agua liviana, o una mezcla de este y uranio empobrecido sobrante de las plantas de enriquecimiento. Alrededor de 4000 MWe de PWR podrían alimentar 1000 MWe de CANDU, con la adición de uranio empobrecido. El torio, denominado “combustible del futuro”, también puede ser utilizado en los reactores PHWR.

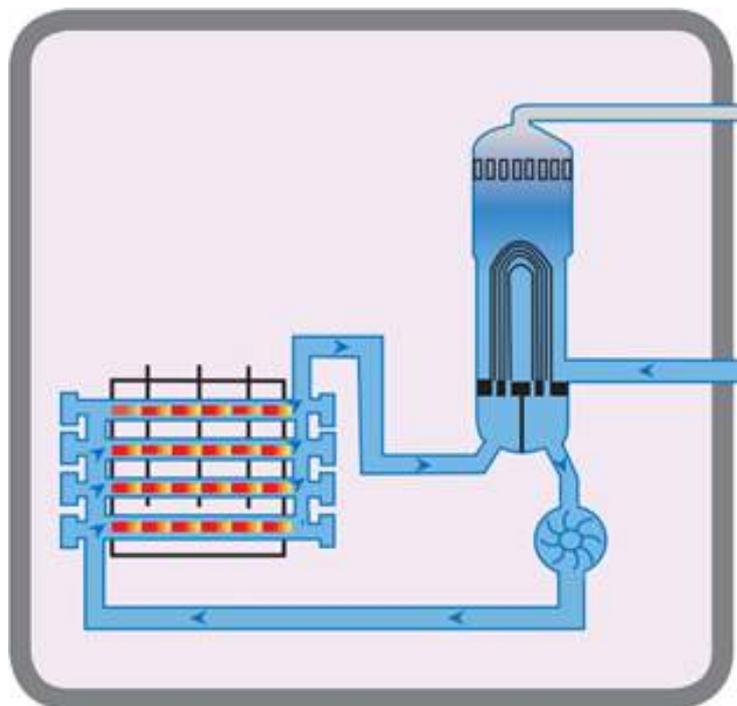


Figura N°15: Esquema de un reactor de tipo PHWR-CANDU

- **GCR (Gas Cooled Reactor)**

Estos reactores fueron construidos en el Reino Unido desde 1956 hasta 1971 pero ahora han sido superados. También se los denomina como reactor Magnox, por utilizar como combustible uranio metálico natural recubierto por una aleación de magnesio. Trabajan con grafito como moderador y dióxido de carbono (gas) como refrigerante primario. El gas extrae el calor del núcleo y lo transfiere en generadores de vapor a un circuito secundario de agua, cuyo vapor generado es derivado al turbogruppo para generar energía eléctrica.

Con el fin de mejorar la eficiencia y rentabilidad de este tipo de reactores, fue necesario trabajar con el refrigerante a mayor temperatura. Esto implicó principalmente cambios en los elementos combustibles dado que la aleación de magnesio no soportaba tan altas temperaturas. La aleación de magnesio fue reemplazada por un revestimiento de acero inoxidable, pero como éste tiene cierta tendencia a absorber neutrones, fue necesario enriquecer el uranio para no perder reactividad.

El diseño resultante es conocido como el reactor avanzado refrigerado por gas o AGR. El combustible está conformado por pellets de óxido de uranio enriquecido al 2,5% - 3,5%, en tubos de acero inoxidable. El dióxido de carbono circula a través del núcleo alcanzando unos 650 °C.

Estos reactores logran una mayor eficiencia ($\approx 40\%$) respecto a los reactores refrigerados por agua ($\approx 33\%$) dado que el dióxido de carbono puede ser calentado a mayores temperaturas.

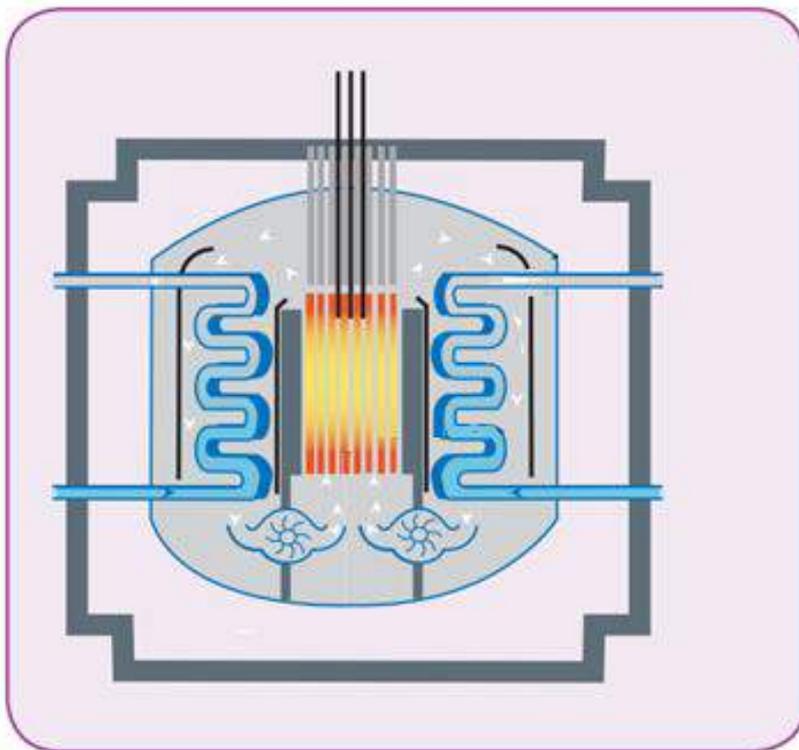


Figura N°16: Esquema de un reactor de tipo GCR

- **FBR (Fast Breeder Reactor)**

La principal característica que diferencia a estos reactores es que operan con neutrones rápidos. No utilizan moderador ni agua como refrigerante, dado que ésta actuaría también como moderador. En general refrigeran el núcleo del reactor con un metal en estado líquido.

La ventaja principal de trabajar con neutrones rápidos es que tienen la capacidad de fisiónar el isótopo más abundante del uranio (U-238), cuya proporción en la naturaleza es del 99,27% (los reactores moderados fisiónan principalmente el U-235 cuya proporción en la naturaleza es del 0,72%, o si está enriquecido se encuentra en un 4% - 5% como máximo).

Otro aspecto importante a destacar de esta tecnología es que cuentan con un reflector capaz de producir más combustible del que utiliza el reactor para generar energía, de ahí deriva su nombre: Reactor Reprodutor Rápido, de sus siglas en inglés. Los reactores de neutrones rápidos también pueden quemar actínidos de larga duración que se recuperan del combustible usado a partir de reactores comunes.

Estos reactores tienen una tecnología estudiada desde la década de 1950, pero sin embargo actualmente se encuentran sólo tres unidades operativas inyectando energía a la red eléctrica (dos unidades en Rusia y una unidad en China). Si bien aún es una tecnología costosa, es probable que se desarrollen más en la próxima década.

Varios países tienen programas de investigación y desarrollo para mejorar los reactores de neutrones rápidos, y el programa INPRO del OIEA que involucra a 22 países, tiene los reactores de neutrones rápidos como un énfasis importante, en relación con el ciclo de combustible cerrado. Por ejemplo, un escenario en Francia es que la mitad de la capacidad nuclear actual sea reemplazada por reactores de neutrones rápidos para 2050.

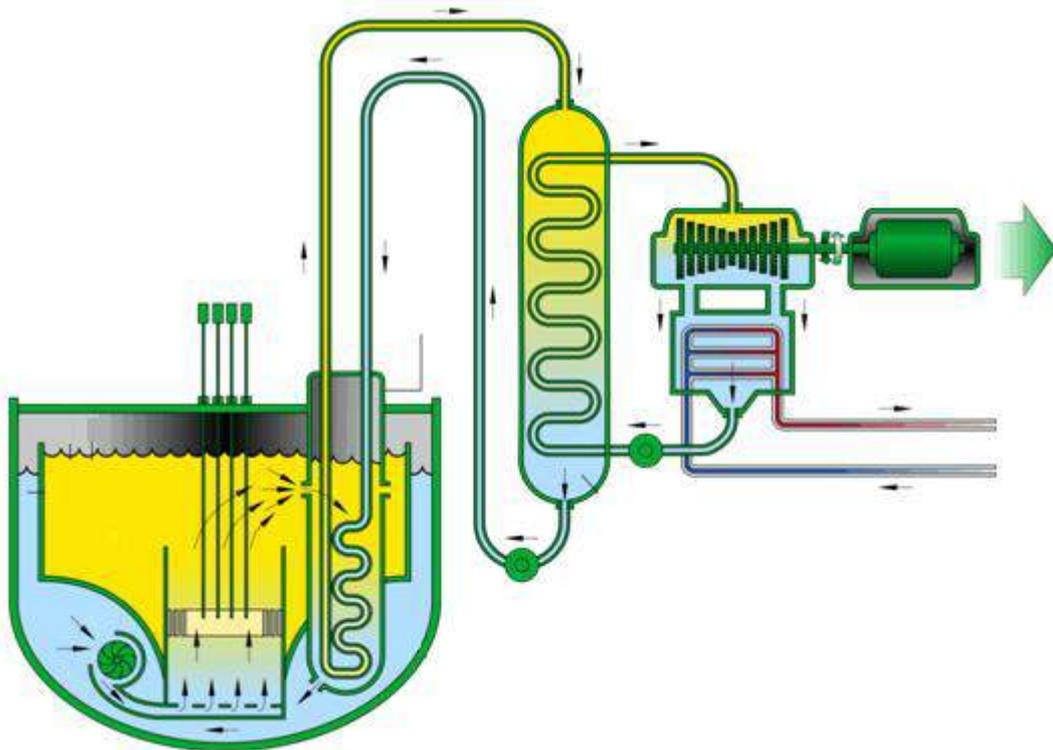


Figura N°17: Esquema de un reactor de tipo FBR

5.4.2. Resumen de tipos de reactores

A continuación se incluye una tabla comparativa con las características principales de los tipos de reactores analizados, y luego una gráfica con la cantidad de reactores en operación por tipo a febrero de 2019.

| CARACTERÍSTICA | PWR | BWR | LWGR | PHWR | GCR (AGR) | FBR |
|-------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------------------------|
| Combustible | UO ₂ | UO ₂ | UO ₂ | UO ₂ | U metálico | UO ₂ / PuO ₂ |
| Enriquecido / natural | Enriquecido | Enriquecido | Enriquecido | Natural | Enriquecido | Natural |
| Refrigerante | Agua liviana | Agua liviana | Agua liviana | Agua Pesada | CO ₂ | Sodio |
| Moderador | Agua liviana | Agua liviana | Grafito | Agua Pesada | Grafito | ----- |
| Generación de vapor | Indirecta | Directa | Directa | Indirecta | Indirecta | Indirecta |
| Cantidad en operación | 301 | 72 | 15 | 49 | 14 | 3 |
| Porcentaje en operación | 66,3% | 15,8% | 3,3% | 10,8% | 3,0% | 0,8% |

Tabla N°19: Tabla comparativa de tipos de reactores [Elaboración propia]

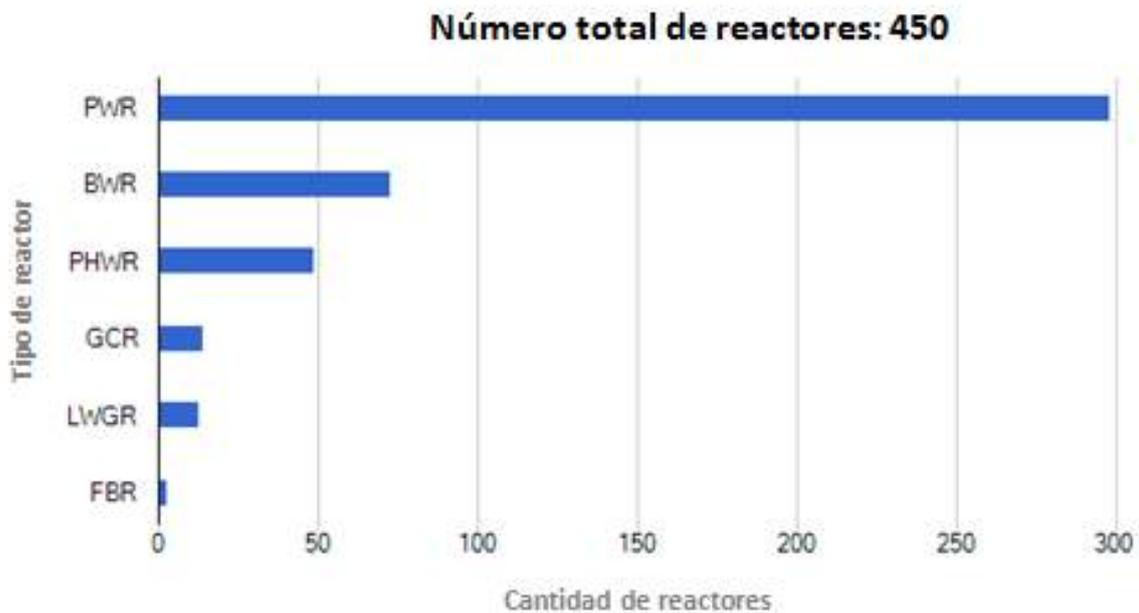


Gráfico N° 66: Cantidad de reactores en operación ordenados por tecnología [PRIS-IAEA]

6. ENERGÍA NUCLEAR DEL FUTURO: ESCENARIOS Y TECNOLOGÍAS

La energía nuclear a lo largo de la historia se ha adaptado continuamente a los requerimientos de los mercados de energía y ha modificado los diseños de sus reactores nucleares con el objeto de aumentar su seguridad y eficiencia.

Respecto de esta premisa, en la actualidad se están analizando escenarios futuros para el desarrollo de la energía nuclear, como por ejemplo: cooperación entre países para la implementación de un ciclo de combustible nuclear optimizado, diseño y fabricación de reactores nucleares modulares, reactores que utilizan Torio en vez de Uranio combustible nuclear y desarrollo de reactores de fusión nuclear, entre otros.

Adicionalmente a estos proyectos, en la actualidad se está trabajando en una posible integración futura entre energía nuclear y energías renovables.

A continuación se describen brevemente y de manera conceptual los proyectos mencionados.

6.1. Proyectos GAINS y SYNERGIES

En el año 2000 se estableció el Proyecto Internacional sobre Reactores Nucleares Innovadores y Ciclos de Combustible (INPRO), como un proyecto emblemático del OIEA. El objetivo principal es garantizar un suministro de energía nuclear sostenible para ayudar a satisfacer las necesidades mundiales de energía del siglo XXI.

Las actividades de INPRO se centran en los conceptos clave de la sostenibilidad global de la energía nuclear y el desarrollo de estrategias de energía nuclear de largo alcance. Para ello realizan el modelado de escenarios con el objeto de comprender y predecir las cuestiones clave de la transición a futuros sistemas de energía nuclear con mayor eficiencia y seguridad.

Existen dos proyectos de colaboración de INPRO denominados GAINS y SYNERGIES. Estos proyectos han desarrollado un marco para el análisis y la evaluación de la sostenibilidad de los escenarios de evolución de la energía nuclear, desde la flota actual de reactores nucleares y los ciclos de combustible, hasta los futuros sistemas de energía nuclear (NES por sus siglas en inglés) con soluciones innovadoras.

- **PROYECTO GAINS:**

El proyecto colaborativo INPRO sobre Arquitectura global de sistemas innovadores de energía nuclear basados en reactores térmicos y rápidos que incluyen un ciclo de combustible cerrado (GAINS), realizado entre los años 2008-2011, ha introducido un modelo mundial heterogéneo para reflexionar sobre las políticas de diferentes países con respecto al ciclo del combustible nuclear. Este modelo permite analizar opciones de cooperación entre países en un ciclo de combustible nuclear.

El modelo heterogéneo puede involucrar ciertos grados de cooperación entre grupos de países no geográficos (caso sinérgico) o puede no involucrar cooperación (caso no sinérgico). El modelo mundial heterogéneo es, por lo tanto, una parte del marco utilizado para evaluar las diversas estrategias de desarrollo del ciclo del combustible nuclear que persiguen diferentes países y para definir un potencial de cooperación mutuamente beneficiosa.

- **PROYECTO SYNERGIES:**

El proyecto colaborativo INPRO SYNERGIES aplicó y modificó el marco analítico desarrollado en GAINS para modelar más específicamente las diversas formas de colaboración entre países. A su vez evalúa los beneficios y problemas relevantes para la colaboración, e identifica escenarios y arquitecturas colaborativas que aseguran un beneficio mutuo para proveedores y usuarios de tecnologías pacíficas de energía nuclear. Los resultados del estudio optimizan la manera de mejorar la sostenibilidad de los sistemas de energía nuclear en el siglo XXI.

6.2. Reactores modulares pequeños

Se denomina Reactor Modular Pequeño o reactor SMR por sus siglas en inglés, a aquellos reactores cuya potencia es inferior a los 300 MWe y son capaces de agruparse con otros módulos para llegar a formar un central nuclear de mayor capacidad.

Estos reactores poseen características de ingeniería avanzadas, están diseñados para ser construidos en fábricas y luego transportados a las compañías eléctricas para su instalación conforme aumenta la demanda.

Esto despierta un gran interés en el mercado internacional, dado que cada cliente puede optar por vincular los módulos que considere según su necesidad, a un menor costo, con una rápida instalación estimada en 18 meses y con la ventaja que pueden ser instalados en zonas alejadas de los tendidos eléctricos, por ejemplo para suministrar energía a fábricas, plantas industriales o pequeñas ciudades remotas.

En todo el mundo existen unos 50 diseños y conceptos de SMR. La mayoría de ellos están en diversas etapas de desarrollo y de algunos se afirma que podrán desplegarse a corto plazo. Actualmente existen reactores SMR en etapas avanzadas de construcción en la Argentina, China y Rusia. A su vez, varios países en el ámbito de la energía nuclear y en fase de incorporación están llevando a cabo actividades de investigación y desarrollo de SMR.

- **Caso particular de Argentina: Reactor CAREM**

El CAREM es el primer reactor nuclear de potencia íntegramente diseñado y construido en la República Argentina, que reafirma con este nuevo hito su capacidad para el desarrollo y puesta en marcha de centrales nucleares, perfilándose a su vez como uno de los líderes mundiales en el segmento de reactores modulares de baja y media potencia.

El prototipo está siendo construido en Lima, provincia de Buenos Aires, convirtiéndose en el primer reactor SMR del mundo en estar oficialmente en construcción.

Esta primera versión de los reactores tipo CAREM será capaz de generar 32 megavatios eléctricos, y se destaca por un riguroso estándar de seguridad aplicado desde el diseño, obtenido mediante soluciones de alta ingeniería que simplifican su construcción, operación y mantenimiento.

Se prevé que alrededor del 70% de sus insumos, componentes y servicios vinculados sea provisto por empresas argentinas certificadas bajo los exigentes estándares internacionales de calidad, supervisados por la Comisión Nacional de Energía Atómica de Argentina (CNEA).

En paralelo al desarrollo del prototipo, la CNEA avanza en el diseño conceptual del módulo comercial del reactor CAREM, el cual tendrá una potencia mayor entre 100 y 120 MWe, y sería la base de una central multi-reactor que permitirá alcanzar costos muy competitivos para el mercado internacional.



Figura N°18: Núcleo del reactor CAREM (izq.) – avance de obra a julio de 2019 (der.)

6.3. Reactores nucleares de IV Generación

En el año 2000 se creó el Foro Internacional de Generación IV (GIF), iniciado por el Departamento de Energía de los EE.UU. y formalmente constituido a mediados de 2001. Es un colectivo internacional que representa a gobiernos de 13 países donde la energía nuclear se considera vital para el futuro.

Los miembros fundadores originales de GIF son Argentina, Brasil, Canadá, Francia, Japón, Corea del Sur, Sudáfrica, Reino Unido y Estados Unidos. A ellos se unieron Suiza, China, Rusia, Australia y, a través del programa de investigación y capacitación de Euratom, la Unión Europea.

Más de 100 expertos evaluaron alrededor de 130 diseños de reactores nucleares, pero sólo 6 de esos diseños fueron seleccionados y determinados como los reactores de Generación IV, en base al cumplimiento de los siguientes objetivos:

- **Sustentabilidad:** el suministro de energía sostenible que cumple con los objetivos de aire limpio, brinda disponibilidad a largo plazo de sistemas y una utilización efectiva del combustible para la producción de energía en todo el mundo. También para minimizar y gestionar los residuos, mejorando así la protección para el público y el medio ambiente.
- **Economía:** los reactores tendrán una clara ventaja de costo del ciclo de vida sobre otras fuentes de energía, junto con un menor riesgo financiero debido a una mayor confiabilidad.

- **Seguridad:** los reactores se destacarán en seguridad. Tendrán una probabilidad de daño en el núcleo extremadamente baja, junto con una severidad minimizada en el caso de un accidente. Los sistemas de respuesta de emergencia se optimizarán y no requerirán una respuesta de emergencia fuera del sitio.
- **Resistencia a la proliferación:** el uso del reactor y el procesamiento de combustible nuclear aumentará la seguridad de que los materiales no sean atractivos para el robo y el terrorismo, junto con un sistema de protección física para evitar el desvío del combustible.

Los 6 reactores determinados por GIF como los reactores del futuro tienen claras ventajas y avances tecnológicos en comparación con los reactores en uso hoy en día, junto con el cumplimiento de los objetivos enumerados anteriormente.

La mayoría de los 6 sistemas emplean un ciclo de combustible cerrado, lo que reduce significativamente los residuos producidos y permite la reutilización del combustible gastado.

Sus temperaturas de operación serán más elevadas que las temperaturas operativas de los reactores actuales, lo que aumenta considerablemente la eficiencia de los mismos. Se espera el inicio de construcción de estos reactores a partir del año 2030.

Las 6 tecnologías de Generación IV son las siguientes:

- I. Reactor de muy alta temperatura (en inglés: Very-High-Temperature Reactor, VHTR)
- II. Reactor enfriado por agua supercrítica (en inglés: Supercritical-Water-Cooled Reactor, SCWR)
- III. Reactor de sal fundida (en inglés: Molten-Salt Reactor, MSR)
- IV. Reactor rápido enfriado por gas (en inglés: Gas-cooled Fast Reactor, GFR)
- V. Reactor rápido enfriado por sodio (en inglés: Liquid Metal Fast Breeder Reactor, LMFBR)
- VI. Reactor rápido enfriado por plomo (en inglés: Lead-cooled Fast Reactor, LFR)

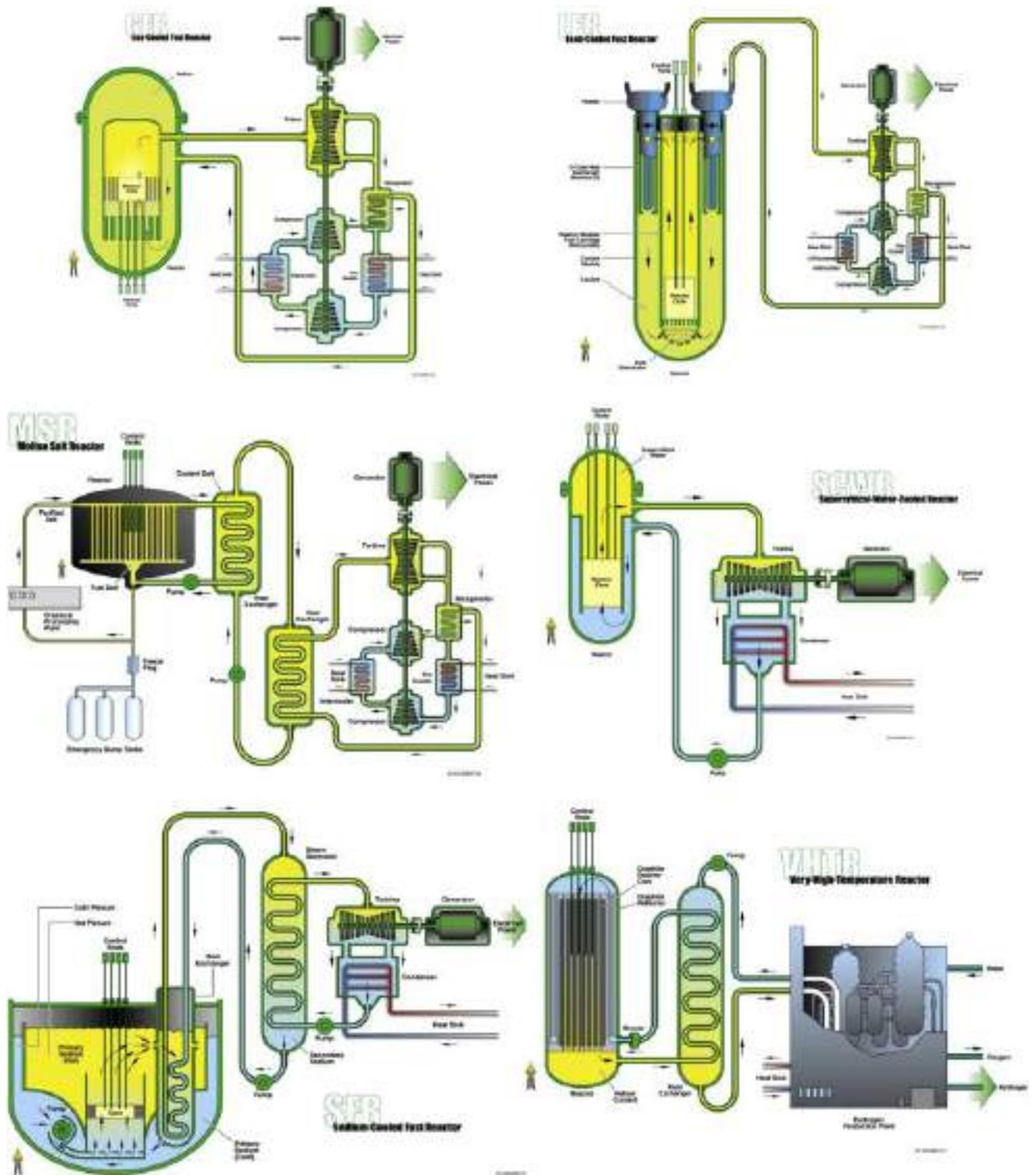


Figura N°19: Concepto de las 6 tecnologías de reactores nucleares de Generación IV

6.4. Posible integración futura de energía nuclear con energías renovables

El OIEA y la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA, por sus siglas en inglés) cooperan combinando las competencias complementarias de ambas organizaciones en la esfera de la planificación energética, con miras a aumentar la eficacia y los efectos de las actividades de creación de capacidad en esa esfera.

La IRENA es una organización intergubernamental que presta apoyo a los países en su transición a un futuro de energía sostenible. Sirve de plataforma principal para la cooperación internacional, centro de excelencia y repositorio de políticas, tecnología, recursos y conocimientos financieros en materia de energía renovable. A su vez promueve la adopción generalizada y el uso sostenible de la energía renovable en todas sus formas, entre ellas la bioenergía y la energía geotérmica, hidroeléctrica, oceánica, solar y eólica, para procurar el desarrollo sostenible, el acceso a la energía, la seguridad energética, el crecimiento económico con bajas emisiones de carbono y la prosperidad.

La colaboración entre el OIEA y la IRENA se formalizó mediante un acuerdo de disposiciones prácticas que ambas organizaciones firmaron el 2 de noviembre de 2016. En virtud del acuerdo, el OIEA y la IRENA impulsan las siguientes actividades:

- Intercambio de información no clasificada sobre las necesidades y oportunidades de creación de capacidad en sus respectivos miembros y sobre eventos de capacitación pasados y futuros.
- Participación de expertos nacionales y regionales (incluidos conferenciantes y alumnos) designados por la otra parte en el acuerdo en los eventos de capacitación celebrados por una de las partes o con su patrocinio.
- Intercambio de la información no clasificada sobre la capacidad de planificación energética existente en los respectivos miembros.
- Intercambio de las metodologías y los datos no clasificados pertinentes en los eventos de creación de capacidad celebrados por la otra parte en el acuerdo.
- Consultas mutuas con miras a combinar las oportunidades de creación de capacidad y evitar la duplicación de recursos.
- Cooperación en la elaboración de estudios de casos nacionales y regionales.

La capacitación de expertos nacionales en planificación energética es el foco de un nuevo acuerdo de cooperación entre la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA) y el OIEA. Ambas agencias están apoyando a sus respectivos Estados Miembros en los esfuerzos para combatir el calentamiento global y mitigar el cambio climático.

El acuerdo firmado por el Director General de IRENA, Adnan Z. Amin en Abu Dhabi el 27 de septiembre y por el Director General de OIEA, Dazhu Yang el 2 de noviembre en Viena, establece un marco para la cooperación en el área de planificación energética y tiene como objetivo mejorar la eficacia y el impacto de la capacidad construyendo esfuerzos en esa área.

6.5. Reactores de fusión nuclear – PROYECTO ITER

La fusión nuclear es la fuente de energía del Sol y las estrellas. Las condiciones de presión y temperatura en el núcleo de estos cuerpos estelares, genera que los núcleos de hidrógeno colisionen, se fusionan en átomos de helio más pesados y liberen enormes cantidades de energía en el proceso.

La ciencia de la fusión del siglo XX identificó la reacción de fusión más eficiente en el laboratorio como la reacción entre dos isótopos de hidrógeno, el deuterio (D) y el tritio (T). La reacción de fusión DT produce la mayor ganancia de energía a las temperaturas "más bajas".

Se deben cumplir tres condiciones para lograr la fusión en un laboratorio: temperatura muy alta (del orden de los 150.000.000 °C); suficiente densidad de partículas plasmáticas (para aumentar la probabilidad de que ocurran colisiones); y suficiente tiempo de confinamiento (para retener el plasma, que tiene una propensión a expandirse, dentro de un volumen definido). A temperaturas extremas, los electrones se separan de los núcleos y un gas se convierte en plasma, a menudo denominado el cuarto estado de la materia. Los plasmas de fusión proporcionan el entorno en el que los elementos ligeros pueden fusionarse y producir energía.

- **PROYECTO ITER**

El acrónimo ITER responde a las siglas *International Thermonuclear Experimental Reactor* (Reactor Experimental Termonuclear Internacional), aunque la palabra "Iter" también significa "el camino" en latín. Se trata de uno de los proyectos energéticos más ambiciosos del mundo.

El proyecto ITER es una colaboración de 35 países comprendidos dentro de siete miembros principales: China, la Unión Europea, Japón, Corea del Sur, Rusia y Estados Unidos. Tras la firma del Acuerdo para su desarrollo en 2006, los miembros se han comprometido a compartir el costo de la construcción, operación y desmantelamiento del proyecto, así como los resultados experimentales y cualquier propiedad intelectual generada.

Este proyecto experimental es de crucial importancia para el avance de la fusión nuclear mediante la demostración de la viabilidad de la fusión, como fuente de energía a gran escala y libre de emisiones de gases de efecto invernadero.

El primer plasma de ITER está programado para diciembre de 2025. Esa será la primera vez que se encienda la máquina, y el primer acto del programa operativo luego de varias décadas de proyecto.

ITER será el primer dispositivo de fusión que conseguirá una ganancia neta de energía (es decir, se produce más energía que la absorbida por el funcionamiento del sistema), así como el primer dispositivo que mantendrá la fusión durante periodos largos de tiempo. También será el primero en poner a prueba las tecnologías integradas para la producción comercial de la electricidad de fusión. Será una herramienta experimental única, diseñada específicamente para lograr los siguientes objetivos:

- I. Desarrollar una potencia térmica de 500 MW. ITER no transforma toda la energía que produce en electricidad, pero al ser el primer proyecto de fusión que produce energía de ganancia neta, prepara el camino para diseñar una próxima máquina que sea capaz de hacerlo.
- II. Demostrar la operación integrada de tecnologías para una central de fusión ITER acortará la distancia entre los dispositivos experimentales de fusión de más pequeña escala actuales y las centrales de energía de fusión de demostración del futuro. Los científicos podrán estudiar plasmas en condiciones similares a las que se esperan de una central nuclear futura y probar aspectos tales como calentamiento, control, diagnóstico, criogenia y mantenimiento remoto.
- III. Conseguir plasma de deuterio y tritio donde la reacción sea prolongada mediante calentamiento interno. Hoy en día, la investigación de fusión se encuentra a las puertas de conseguir "plasma en combustión", donde el calor de la reacción de fusión está confinado dentro del plasma de manera que se pueda prolongar la reacción durante un plazo amplio.
- IV. Hacer pruebas para la producción de tritio. Una de las misiones de las últimas etapas de la operación ITER será demostrar la viabilidad de producir tritio dentro de la vasija en vacío. El suministro mundial de tritio (que se utiliza con el deuterio para producir la reacción de fusión) no basta para cubrir las necesidades de las centrales nucleares del futuro. ITER aportará una oportunidad única para hacer pruebas de simulación respecto de la producción de tritio.
- V. Demostrar la seguridad de las características de un dispositivo de fusión. ITER alcanzó un hito importante en la historia de la fusión en 2014, cuando obtuvo licencia como operador nuclear en Francia tras un riguroso examen de sus procedimientos de seguridad. Uno de los objetivos principales de la operación de ITER es demostrar que se pueden controlar el plasma y las reacciones de fusión sin consecuencias para el medio ambiente.



Figura N°20: Proyecto ITER – avance de obra a abril de 2019

7. CONCLUSIONES

En la presente tesis se realizó un análisis cualitativo y luego cuantitativo respecto de la proyección de la potencia instalada nuclear mundial. Para ello se ponderó la potencia a incorporar y a retirar de servicio por cada país, considerando una situación de mínima y una situación de máxima, desde el año en curso (2019) hasta el año 2030.

El resultado obtenido de dicho análisis y presentado en el punto 4.5 de la presente tesis, arroja como conclusión que la potencia instalada nuclear mundial permanecerá prácticamente constante hasta el año 2030.

Si bien el continente asiático está apostando fuertemente al crecimiento de la energía nuclear, en Europa ocurre todo lo contrario. Las decisiones de los diferentes países, particularmente las relacionadas con el cierre de las centrales nucleares, están en general muy influenciadas por la opinión pública y no por consideraciones respecto de la competitividad de la tecnología nuclear.

A continuación se presenta la potencia instalada mundial, en donde se promedia la situación de mínima y máxima obtenidas en el gráfico del punto 4.5.



Gráfico N° 67: Proyección de potencia instalada mundial promedio

De la información arrojada por el gráfico se observa que la potencia instalada nuclear mundial permanece relativamente constante. Podría plantearse una primera hipótesis donde se infiere una estabilidad en el aporte de energía nuclear mundial respecto de la situación actual.

Acto seguido resulta indispensable vincular la proyección de la demanda energética total mundial con los resultados obtenidos, ya que sería un error inferir que la potencia instalada total en el mundo también permanecerá constante.

Según la Agencia Internacional de Energía, las regiones del mundo con mayor demanda de energía eléctrica aumentarán su consumo para el año 2040, en promedio cerca del 70% más de lo que requerían en el año 2017. [14]

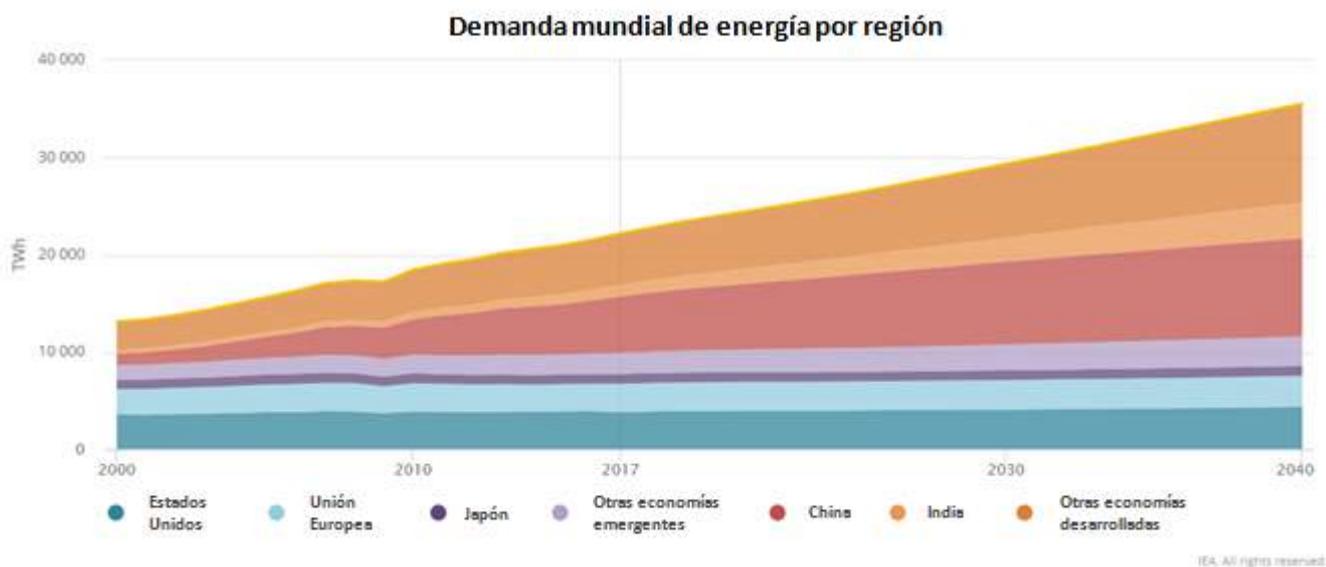


Gráfico N° 68: Proyección de demanda mundial de energía eléctrica

Respecto de la proyección de generación mundial de energía, la cual acompaña a la proyección del consumo, se espera un aumento a razón de un 600 TWh por año entre el año 2000 y el año 2040, según los resultados de la Agencia Internacional de Energía, actualizados en el año 2018. En porcentaje, el aumento de la generación mundial de energía eléctrica representa aproximadamente un incremento del 4% anual. [16]

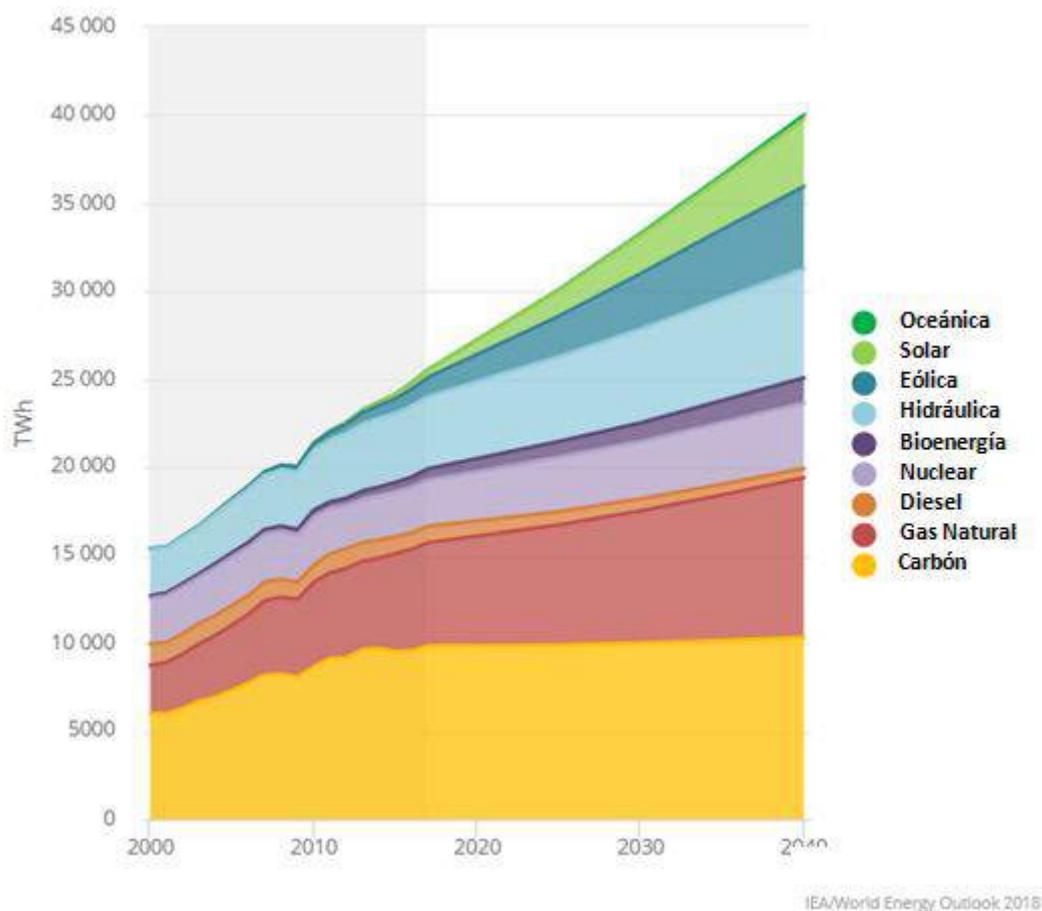


Gráfico N° 69: Proyección de generación mundial de energía eléctrica

Para poder satisfacer la creciente demanda de energía, es necesario aumentar la capacidad de generación. Para ello, el aumento de potencia instalada debe acompañar al aumento de demanda.

En este caso, la estimación de la Agencia Internacional de Energía para el incremento de potencia instalada total es de aproximadamente un 3% por año, lo que representa cerca de 230 GW de potencia nueva a incorporar por año en el mundo.

A continuación se representa la proyección de la potencia instalada mundial necesaria para satisfacer la demanda, en relación con la proyección de potencia instalada nuclear obtenida en la presente tesis.

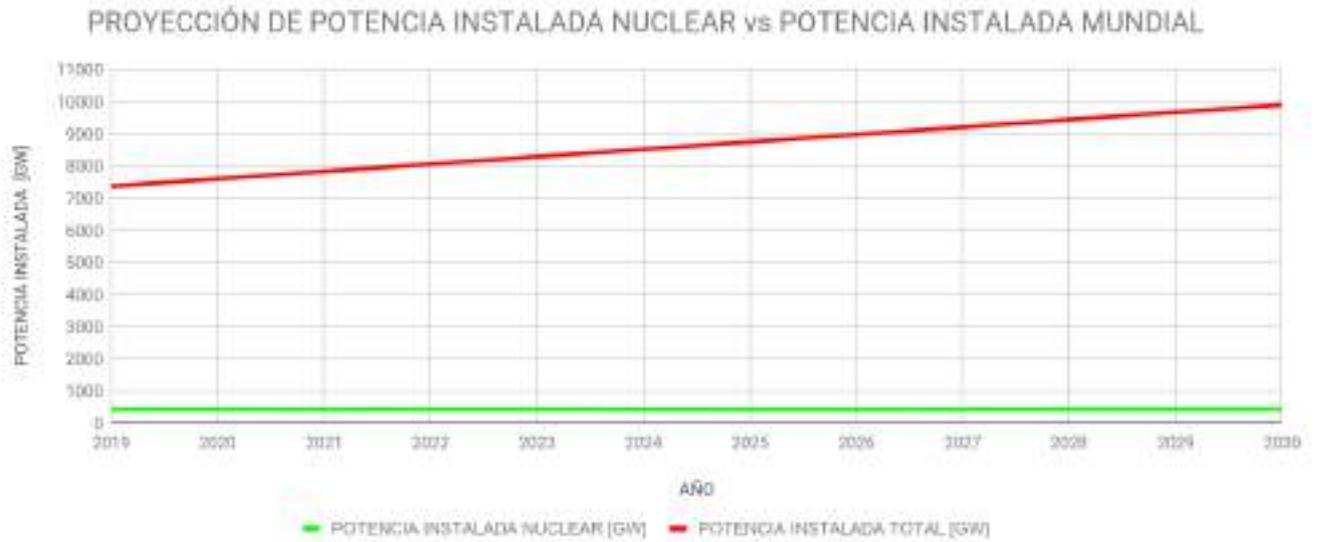


Gráfico N° 70: Proyección de potencia instalada nuclear vs potencia instalada total mundial

De la comparación se concluye que si la potencia instalada nuclear permanece constante pero la potencia instalada total aumenta a razón de 230 GW por año, la participación nuclear en la generación mundial disminuirá significativamente en los próximos 10 años, como se muestra a continuación.



Gráfico N° 71: Proyección de participación nuclear en la potencia instalada total mundial

La energía nuclear es considerada una energía limpia desde el punto de vista de la emisión de gases de efecto invernadero. El Grupo Intergubernamental de expertos sobre Cambio Climático (IPCC) realizó un trabajo de comparación respecto a las emisiones de dióxido de carbono por unidad de energía generada [gCO_2/kwh] analizando cada tipo de tecnología de generación. [15]

En términos generales, se puede concluir que la energía nuclear junto con la energía eólica son las dos tecnologías de generación de energía eléctrica desarrolladas que menos dióxido de carbono liberan a la atmósfera, incluso menos que la energía solar fotovoltaica.

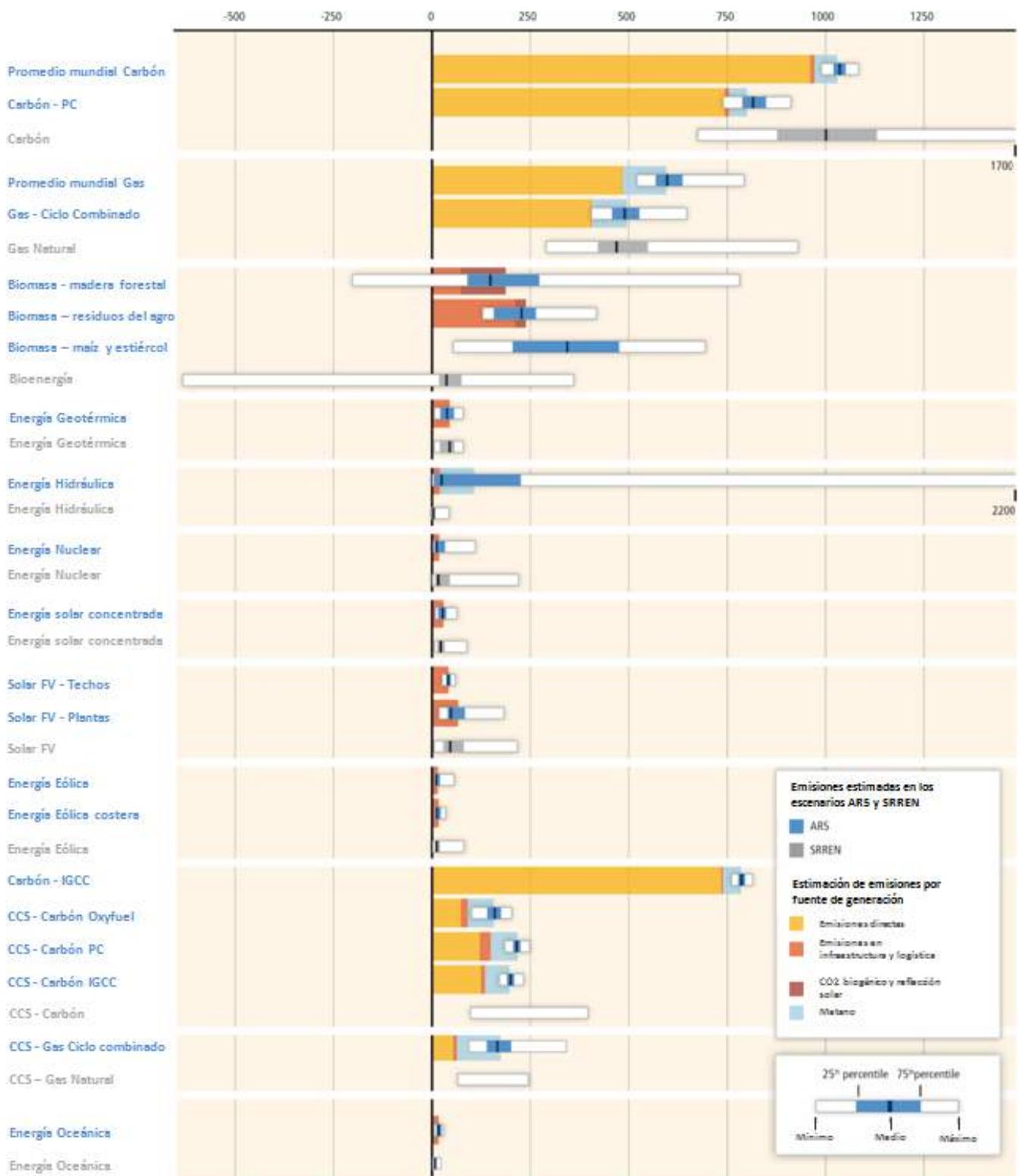


Figura N°21: Emisiones de CO₂ por tecnología [15]

Como es sabido, el mundo está atravesando una problemática real en relación a la creciente concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera. Por tal motivo en el año 2015 se firmó el Acuerdo de París con el objetivo de disminuir inmediatamente la emisión de dichos gases y principalmente la del dióxido de carbono. [16]

Si la demanda de energía eléctrica en el mundo aumenta considerablemente, pero la energía nuclear generada permanece constante, siendo ésta una de las dos tecnologías que menos CO₂ emite, estamos en presencia de un inminente aumento de la producción de gases de efecto invernadero, dado que la creciente demanda de energía será reemplazada con otras tecnologías de generación.

La situación más favorable sería que los 600 TWh anuales de incremento de consumo mundial, sean en su totalidad suministrados por tecnologías renovables, dado que cualquier otra fuente de generación emitirá considerablemente más masa de dióxido de carbono por energía generada.

Si bien la potencia instalada nuclear permanecerá constante (según la proyección del presente trabajo), la potencia instalada de energías renovables se encuentra en importante aumento. Eso es algo positivo, pero la pregunta es: ¿podrán las energías renovables hacerse cargo de la creciente demanda de energía, a bajo costo y garantizando el suministro?

A continuación se presenta la estimación realizada por la Agencia Internacional de Energía respecto de la proyección de potencia instalada de energías renovables, en donde se considera no sólo la energía eólica y solar, sino también la geotérmica, marina e hidráulica.

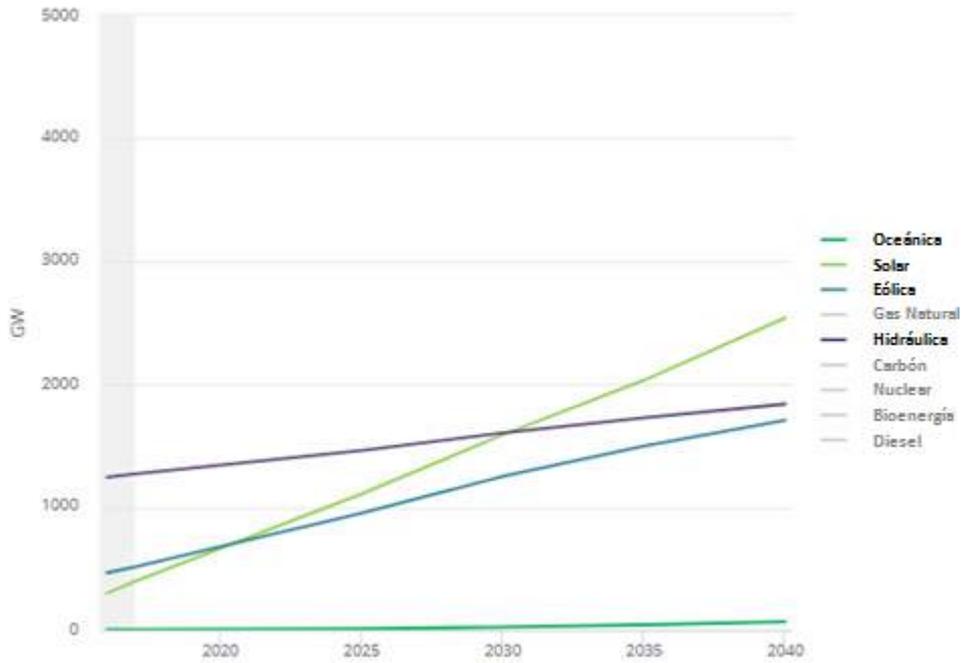


Gráfico N° 72: Proyección de potencia instalada mundial de energías renovables por tecnología [17]

Con el objeto de estimar la pendiente resultante, a continuación se presenta una gráfica en donde se suman las proyecciones de las potencias instaladas de las cuatro fuentes renovables mencionadas anteriormente.

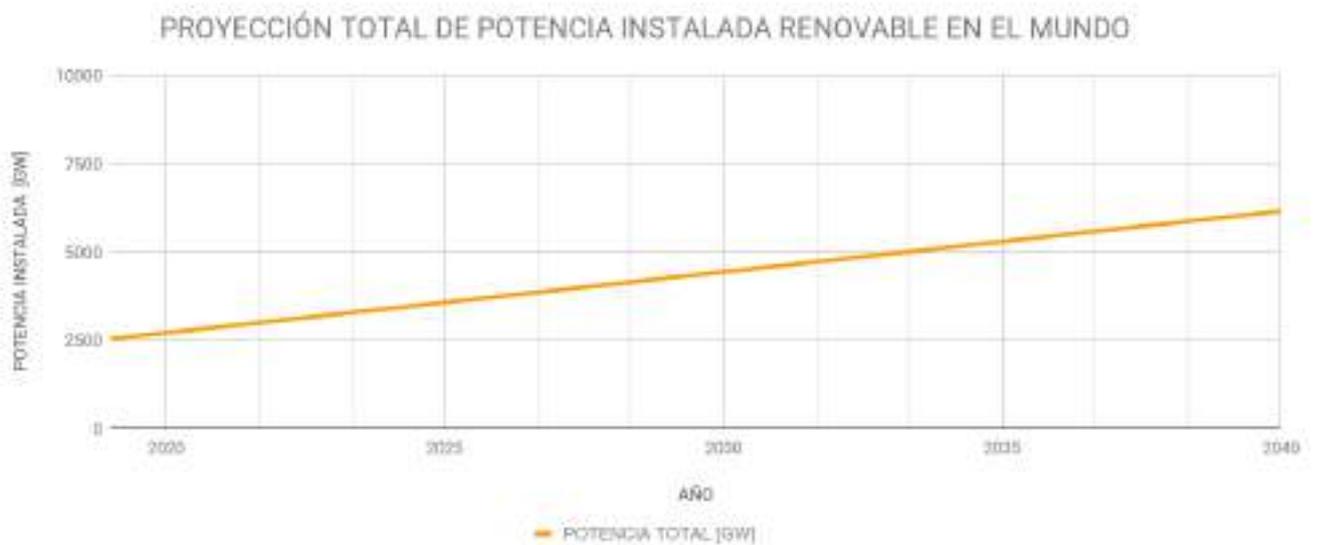


Gráfico N° 73: Proyección de potencia instalada mundial de energías renovables total

Al presente análisis debemos sumarle la consideración de que las energías renovables tienen un bajo factor de carga, esto quiere decir que del total de la potencia instalada renovable, en promedio el 30% de dicha potencia generará energía eléctrica. Por tal motivo, es de suponer que la creciente demanda podrá ser abastecida por el 30% de la potencia instalada renovable y el resto deberá ser suministrado por tecnologías fósiles.

La pendiente promedio de crecimiento de la potencia instalada renovable resulta cercana a los 175 GW anuales. Por lo tanto de los 230 GW de crecimiento anual de potencia instalada mundial sólo 175 GW anuales serán instalados en base a energías renovables, lo que representa en energía aproximadamente 450 TWh anual sobre los 600 TWh anual proyectados.

Dado que la generación de energía nuclear no aumentará, se espera que el déficit de energía sea suministrado por fuentes fósiles. A continuación se presentan los resultados de la Agencia Internacional de Energía respecto de la proyección de potencia instalada de fuentes fósiles, incluida la bioenergía.

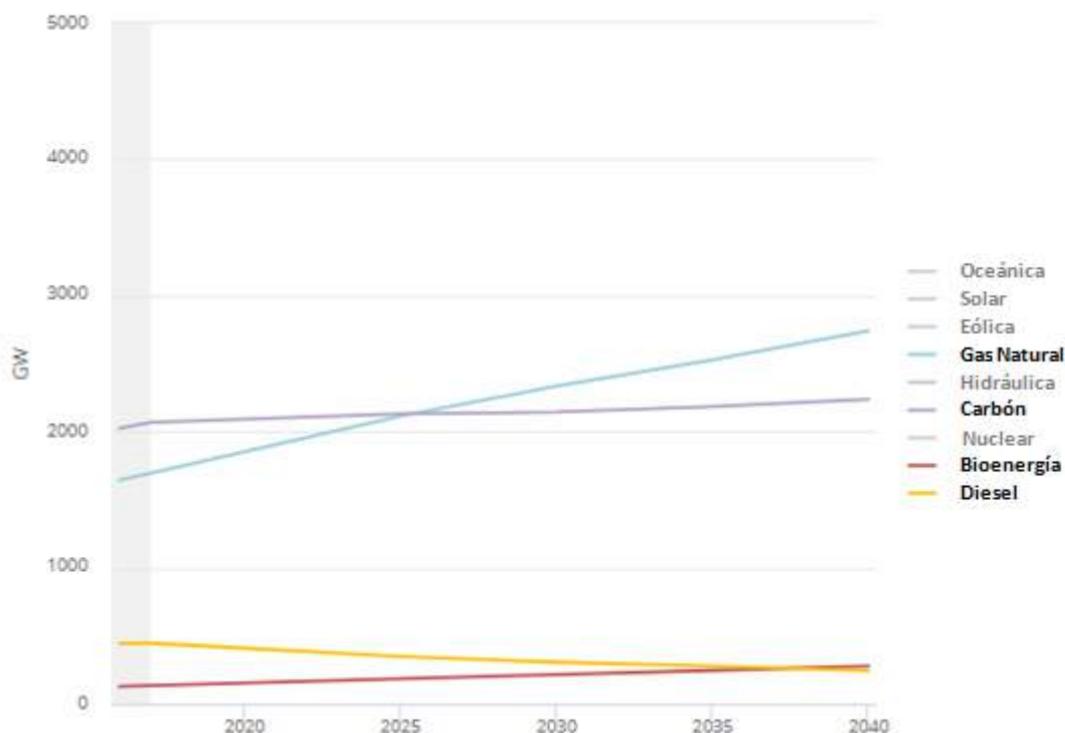


Gráfico N° 74: Proyección de potencia instalada mundial de fuentes fósiles por tecnología [17]

Como se puede apreciar, la generación de energía eléctrica mediante la combustión de gas natural tiene una proyección creciente importante. El carbón, con proyección también positiva, tiene una pendiente de crecimiento menor que la del gas natural (la combustión

del carbón emite aproximadamente el doble de CO₂ que la del gas natural, por unidad de energía generada).

Al igual que se procedió en el análisis de la proyección de potencia instalada de fuentes renovables, a continuación se presenta una gráfica única en donde se contempla la suma de las proyecciones de las cuatro tecnologías fósiles.

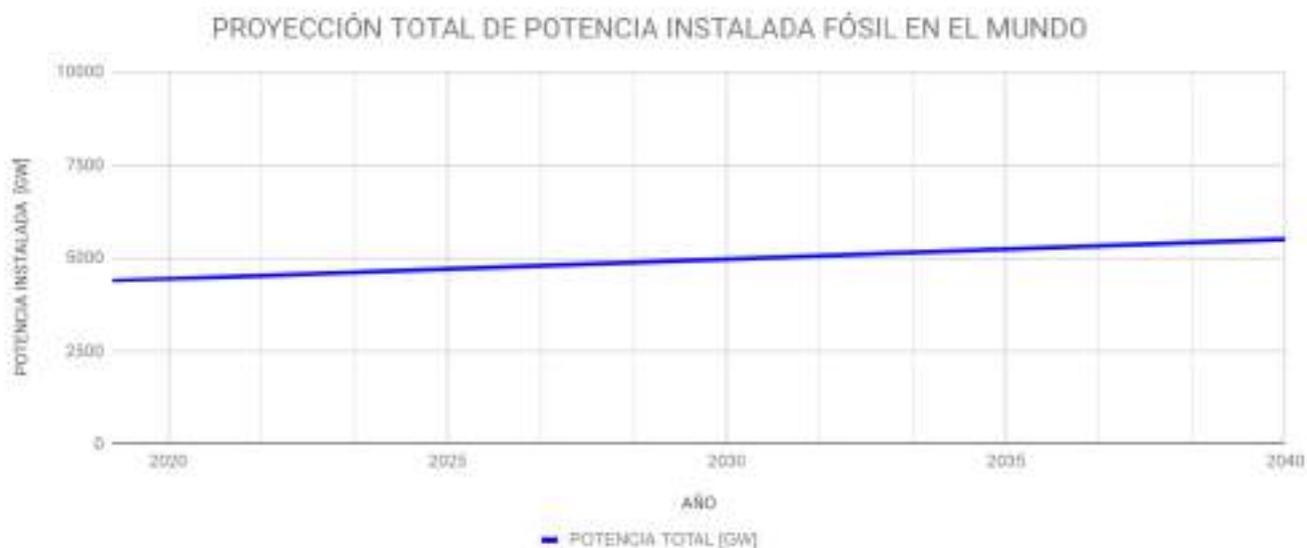


Gráfico N° 75: Proyección de potencia instalada mundial de fuentes fósiles total

Como era esperado, la proyección de crecimiento de generación con fuentes fósiles es de aproximadamente 54 GW anuales, pudiendo alcanzar una generación anual de energía cercana a los 400 TWh.

Para generar energía a base de carbón, gas o cualquier derivado fósil, es necesario realizar la combustión de los mismos y el principal producto de dicha combustión es el dióxido de carbono.

La generación de energía eléctrica con fuentes fósiles, respecto de la energía nuclear o renovables, emite entre 400 y 900 veces más masa de dióxido de carbono por unidad de energía generada, por lo tanto y dada las proyecciones realizadas en la presente tesis, se espera un aumento de las emisiones de dióxido de carbono en los próximos años, en contraposición con los objetivos del Acuerdo de París.

A continuación se presenta la proyección de las emisiones de dióxido de carbono según la Agencia Internacional de Energía.

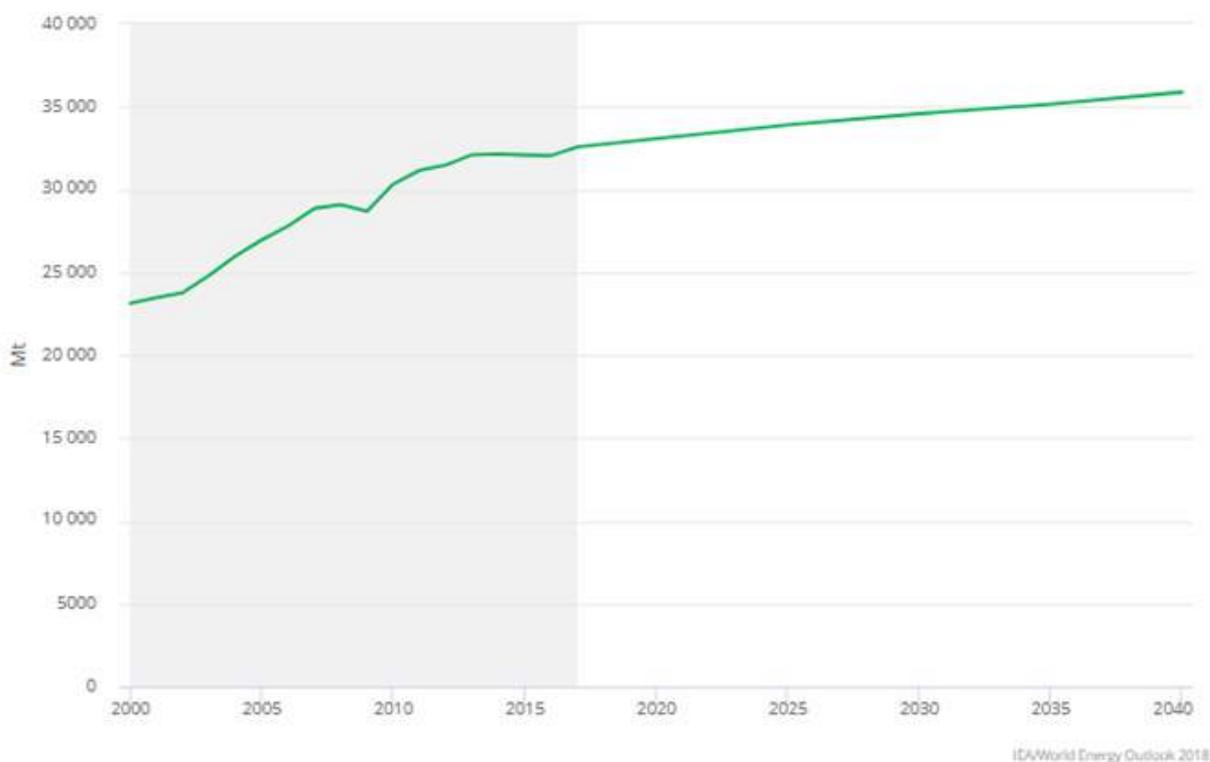


Gráfico N° 76: Proyección de emisiones de CO₂ en el mundo [17]

En términos generales, se puede concluir que frente al fuerte incremento de consumo energético mundial, resulta indispensable proyectar en el tiempo la necesidad de fortalecer la diversificación de matriz energética mundial, apostando a tecnologías de generación con bajas emisiones de gases de efecto invernadero.

En tal sentido se observa la necesidad de ampliar el aporte de la energía nuclear junto con las energías renovables, para poder afrontar la creciente demanda de energía y lograr disminuir los efectos nocivos sobre el cambio climático.

Si bien las energías renovables tienen una proyección de incremento de su potencia instalada a razón de 175 GW anuales, esto no es suficiente para satisfacer la creciente demanda. Como mínimo deberá incrementarse en unos 60 GW por año extras a los 175 GW proyectados, la instalación de nueva potencia de generación libre de gases de efecto invernadero.

En este contexto toma vital importancia la energía nuclear, dado que no emite de gases de efecto invernadero y puede coexistir perfectamente con las energías renovables suministrando energía de base, mientras que las renovables pueden aportar energía de base y de pico, según el diseño del parque energético.

Se concluye que tanto la potencia instalada nuclear como la renovable no proyectada, deben aumentar como mínimo a razón de 60 GW por año, dado que de lo contrario resultará prácticamente imposible cumplir con los objetivos del Acuerdo de París respecto a la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero.

Una proyección razonable podría ser que el 10% del incremento de potencia instalada necesaria de 60 GW por año, sea nuclear y el 90% restante sea renovable. Para ello se requerirán a razón de 5 centrales nucleares nuevas por año, y respecto de las renovables, se requerirá aumentar la proyección actual de incremento de 175 GW por año de nueva potencia instalada, a una proyección de 230 GW por año.

De esta manera se evita la instalación futura de nueva potencia generada a partir de fósiles, caso contrario resultará prácticamente imposible cumplir con los objetivos del Acuerdo de París respecto a la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero.

Es de vital importancia planificar cuál es la tecnología nuclear más adecuada para el futuro, de manera tal que junto con las tecnologías renovables y una cooperación entre diferentes países, se logre un escenario energético eficiente, limpio, económico y seguro.

ABREVIATURAS Y NOMENCLATURA

- ABWR: reactores avanzados de agua en ebullición
- AECL: Atomic Energy of Canada Limited
- AGR: Advanced Gas Cooled Reactor
- AP-1000: Reactor nuclear avanzado de Generación III+
- BWR: Boiling Water Reactor
- CANDU: Canada Deuterium-Uranium Reactor
- CAREM: Central Argentina de Elementos Modulares
- CGN: Corporación de Energía Nuclear de China
- CNEA: Comisión Nacional de Energía Atómica de Argentina
- CNNC: China National Nuclear Corporation
- CNPP: Country Nuclear Power Profiles
- DOE: Departamento de Energía de los EE.UU.
- EDF: Empresa de energía de Francia
- ENEC: Energía Nuclear de Emiratos Árabes
- EPR: Reactor Europeo Presurizado
- FBR: Fast Breeder Reactor
- FMI: Fondo Monetario Internacional
- GAINS: Global Architecture of Innovative Nuclear Energy Systems Based on Thermal and Fast Reactors Including a Closed Fuel Cycle
- GCR: Gas Cooled Reactor
- GEI: Gases de Efecto Invernadero
- IEA: Agencia Internacional de Energía
- INES: Escala Internacional de Accidentes Nucleares
- INPRO: Proyecto Internacional sobre Reactores Nucleares Innovadores y Ciclos de Combustible
- IPCC: Grupo Intergubernamental de expertos sobre Cambio Climático

- IRENA – International Renewable Energy Agency
- KEPCO: Korea Electric Power Corporation
- LWGR = RBMK : Light Water cooled Graphite moderated Reactor
- NPP: Nuclear Power Plant
- NUGEN: Empresa de energía nuclear de Toshiba
- OIEA = IAEA: International Atomic Energy Agency
- OMS: Organización Mundial de la Salud
- PHWR: Pressurized Heavy Water Reactor
- PRIS: Power Reactor Information System
- PWR: Pressurized Water Reactor
- RAOS: Rusatom Overseas
- SBO: Station blackout
- SENER: Secretaría de Energía de México
- SIN: Sistema Interconectado Nacional
- SMR: Reactores Modulares Avanzados
- SNN: Sociedad Nacional Nucleoeléctrica rumana
- TEPCO: Tokyo Electric Power Company Holdings
- TMI: Three Mile Island
- TNP: Tratado de no Proliferación Nuclear
- UNSCEAR: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation
- URSS: Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas
- WANO: Asociación Mundial de Operadores Nucleares
- WNA: World Nuclear Association
- WWER-1200: reactor de tipo PWR de diseño ruso

BIBLIOGRAFÍA

- [1] WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. *The Three Mile Island Accident* - 2012.
- [2] INTERNATIONAL NUCLEAR SAFETY ADVISORY GROUP. *The Chernobyl accident* - 1992.
- [3] ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD. *Chernobyl, la verdadera escala del accidente* - 2005.
- [4] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY GENERAL DIRECTOR REPORT. *Fukushima Daiichi accident* - 2014.
- [5] UNITED NATIONS SCIENTIFIC COMMITTEE ON THE EFFECTS OF ATOMIC RADIATION. *UNSCEAR 2013 Report* - 2013.
- [6] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Nuclear Power Reactors in the World* - 2019.
- [7] COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, Ing. Norberto Coppari. *Boletín energético 41* - 2018.
- [8] COUNTRY NUCLEAR POWER PROFILES - CNPP website.
<https://cnpp.iaea.org/pages/index.htm>
- [9] WORLD NUCLEAR ASSOCIATION - Country Profile website. <http://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles.aspx>
- [10] POWER REACTOR INFORMATION SYSTEM - Country Statistics website.
<https://pris.iaea.org/PRIS/CountryStatistics/CountryStatisticsLandingPage.aspx>
- [11] POWER REACTOR INFORMATION SYSTEM - Standard Reports. *Private Personal Account*.
- [12] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2050* - 2018.
- [13] AGENCIA INTERNACIONAL DE ENERGÍA. *World Energy Outlook 2018 - The gold standard of energy analysis* - 2018.
- [14] AGENCIA INTERNACIONAL DE ENERGÍA. *World Energy Outlook 2018* - 2018.
- [15] GRUPO INTERGUBERNAMENTAL DE EXPERTOS SOBRE CAMBIO CLIMÁTICO. *IPCC Report WG3 – AR5 Cap. 7* - 2014.
- [16] ACUERDO DE PARÍS. *Naciones Unidas – Conferencia de Partes N°21* - 2015.
- [17] AGENCIA INTERNACIONAL DE ENERGÍA. *World Energy Outlook Model 2018* - 2018.