



**UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO**  
**DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍA**

---

**ENERGÍA NUCLEAR EN LA PENÍNSULA DE YUCATÁN**  
*UNA OPCIÓN PARA EL FUTURO*

---

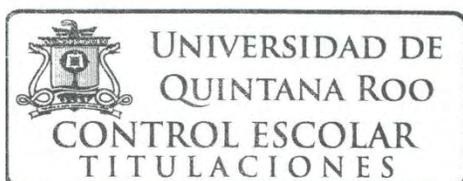
**TESIS**  
**PARA OBTENER EL GRADO DE**

**INGENIERO EN SISTEMAS DE ENERGÍA**

**PRESENTA**  
**GUSTAVO ADRIÁN RODRÍGUEZ SÁNCHEZ**

**DIRECTOR DE TESIS**  
**DR. JAVIER CUITLÁHUAC PALACIOS HERNÁNDEZ**

**ASESORES**  
**DR. JOEL OMAR YAM GAMBOA**  
**M.C. MARÍA NORMA PALACIOS RAMÍREZ**  
**DR. INOCENTE BOJÓRQUEZ BÁEZ**  
**DR. FERNANDO ENRIQUE FLORES MURRIETA**



CHETUMAL QUINTANA ROO, MÉXICO, SEPTIEMBRE DE 2018



**UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO**  
**DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍA**

TRABAJO DE TESIS TITULADO  
"ENERGÍA NUCLEAR EN LA PENÍNSULA DE YUCATÁN. UNA OPCIÓN PARA EL FUTURO"

ELABORADO POR  
**GUSTAVO ADRIÁN RODRÍGUEZ SÁNCHEZ**

BAJO SUPERVISIÓN DEL COMITÉ DE ASESORÍA Y APROBADO COMO REQUISITO PARCIAL  
PARA OBTENER EL GRADO DE:

**INGENIERO EN SISTEMAS DE ENERGÍA**

COMITÉ DE TESIS

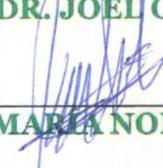
DIRECTOR:

  
\_\_\_\_\_  
**DR. JAVIER CUTTLAHUAC PALACIOS HERNÁNDEZ**

ASESOR:

  
\_\_\_\_\_  
**DR. JOEL OMAR YAM GAMBOA**

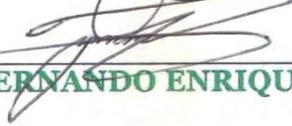
ASESORA:

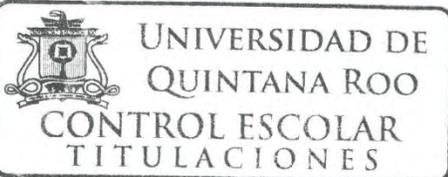
  
\_\_\_\_\_  
**M.C. MARÍA NORMA PALACIOS RAMÍREZ**

ASESOR:

  
\_\_\_\_\_  
**DR. INOCENTE BOJÓRQUEZ BÁEZ**

ASESOR:

  
\_\_\_\_\_  
**DR. FERNANDO ENRIQUE FLORES MURRIETA**



CHETUMAL QUINTANA ROO, MÉXICO, SEPTIEMBRE DE 2018

*A mis padres, Alma y Gustavo.  
A mi abuelo, José Luis Sánchez †.*

For a successful technology, reality must  
take precedence over public relations,  
for nature cannot be fooled.

---

*Richard Feynman*

## Agradecimientos

Agradezco profundamente a mis padres, Gustavo Rodríguez y Alma Rosa Sánchez, por todo el apoyo y el cariño que me han brindado durante mi vida.

A Koshi (Mariela Chuc), por acompañarme en el camino y todo lo que hemos compartido.

Al Dr. Javier Palacios por su paciencia y haber aceptado la dirección de esta tesis.

Al Dr. Omar Yam y la M.C. Norma Palacios, por su apoyo y guía durante esta etapa de mi vida y la elaboración de este trabajo.

Al Dr. Inocente Bojórquez, mi tutor académico, por su amistad y las enseñanzas que me sigue brindando.

Al Dr. Fernando Flores por su ayuda en la elaboración de esta tesis y durante mi formación.

A Juan B. Cabral, del proyecto scikit-criteria, por la amabilidad y el tiempo que dedicó a responder algunas dudas relacionadas con esta tesis.

A todos los profesores que estuvieron siempre dispuestos a apoyarnos y enseñarnos, tanto dentro como fuera de las aulas.

A mis compañeros, de quienes también aprendí mucho. Especialmente con quienes compartí tantas experiencias: Osbet Aguayo, Luciano Belín, Ariel Tah, Cristian Anzures y Daniel Cámara.

Sería una tarea imposible incluir en unos cuantos párrafos a toda la gente a la que agradezco el haber contribuido en mi formación como profesionalista y como persona, así que me disculpo con quienes por cualquier motivo he omitido nombrar en esta dedicatoria. A todos ustedes,

**¡Muchas Gracias!**

## Resumen

Los procesos nucleares se puede utilizar para la generación de electricidad y es una de las fuentes de energía que algunos países, entre ellos México, han incluido en su matriz energética. El objetivo de esta tesis es proponer la tecnología y el sitio para el aprovechamiento de la energía nuclear en la generación de electricidad en la península de Yucatán a mediano y largo plazos, con el fin de avanzar hacia la seguridad energética en la región. Esta propuesta se convertiría en un antecedente que permita a los sectores correspondientes considerar el uso de la energía nuclear en la península. Se presentaron varias características de la energía nuclear, y fueron comparadas algunas como costo, factor de capacidad y emisiones de CO<sub>2</sub> con las de otras fuentes de energía. Se expusieron algunos aspectos concernientes al desarrollo del sector eléctrico y el uso de la energía nuclear en México. Posteriormente se utilizaron dos métodos multicriterio de toma de decisiones, el método de la suma ponderada y el método del producto ponderado, para comparar los diseños de reactores nucleares ABWR, AP 1000, APR 1400, VVER 1200, NuScale, SMART y CAREM. También se hizo un sondeo para identificar posibles sitios para la construcción de centrales nucleolétricas a través de un análisis cualitativo. Se encontró que en la península de Yucatán existen las condiciones y las necesidades tecnológicas y energéticas para justificar el aprovechamiento de la energía nuclear para generación de electricidad. Con base en los rankings obtenidos con el análisis de toma de decisiones multicriterio y el sondeo de sitios, se propuso la sustitución de dos proyectos de cogeneración eficiente por centrales nucleolétricas con 12 reactores NuScale cada una. También se propuso que estas centrales se ubiquen junto a dos lagunas de Campeche y Quintana Roo.

## Índice general

Agradecimientos	I
Resumen	II
Índice de figuras	V
Índice de tablas	VII
Introducción	1
1. Desarrollo Histórico de la Energía Nuclear	1
2. Energía Nuclear en el Mundo	2
3. Energía Nuclear en el Futuro	4
4. Objetivos	6
5. Estructura de la Tesis	6
Capítulo 1. La Nucleoelectricidad	8
1. Principios Físicos	8
2. Elementos de una Central Nucleoeléctrica	12
3. El Ciclo de Combustible	15
4. Tipos de Reactores Nucleares	17
5. Seguridad Nuclear	23
6. Otras Aplicaciones de la Energía Nuclear	29
7. Energía Nuclear y Sustentabilidad	29
8. Energía Nuclear como Opción en la Matriz Energética	37
Capítulo 2. Condiciones en México y la Península de Yucatán	38
1. Marco Legal	38
2. Necesidades Energéticas	43
3. Consideraciones Ambientales	48
4. Consideraciones Económicas	48
5. Consideraciones Sociales	48
6. Energía nuclear en México y la península de Yucatán	49
Capítulo 3. Comparativa de Diseños	50
1. Análisis de Decisiones Multi Criterio (MCDA, Multiple Criteria Decision Analysis)	50
2. Criterios de valuación	52
3. Alternativas	57
4. Métodos Comparativos	63

---

Capítulo 4. Selección del Sitio	65
1. Lineamientos Para la Selección de Sitio	65
2. Potencial de Inundación	68
3. Infraestructura Carretera	68
4. Tráfico Aéreo	68
5. Infraestructura Eléctrica	69
6. Disponibilidad de Agua	70
7. Densidad y Distribución Poblacional	70
8. Áreas Naturales Protegidas	71
9. Riesgos Industriales	71
10. Aspectos Económicos	71
11. Huracanes	72
12. Método de Selección	73
Capítulo 5. Discusión, Propuesta y Conclusiones	75
1. Discusión y Resultados	75
2. Propuesta	79
3. Conclusiones	80
Apéndice A. Proyectos de Incremento de Capacidad en la Península de Yucatán	81
Apéndice B. Matriz de Alternativas y Criterios	83
Apéndice. Bibliografía	85
Apéndice. Siglas	95

## Índice de figuras

1.1. Energía de Enlace por Nucleón	9
1.2. Productos de fisión para neutrones térmicos y de 14 MeV de energía del U-235	10
1.3. Componentes de una planta nuclear	13
1.4. Componentes de un reactor nuclear	13
1.5. Ciclo del combustible nuclear	17
1.6. Esquema de un reactor de agua a presión	18
1.7. Esquema de un reactor de agua en ebullición	19
1.8. Esquema de un reactor de agua pesada a presión	20
1.9. Esquema de un reactor avanzado refrigerado por gas	20
1.10. Esquema de un reactor de cría refrigerado por metal líquido	21
1.11. Capacidad instalada y generación neta de energía eléctrica por fuente a nivel mundial en 2011	31
1.12. Rangos del Costo Nivelado de Generación para tecnologías de carga base con diferentes tasas de descuento	33
1.13. Correlación entre consumo de energía y PIB por persona de varios países en 2011	34
2.1. Consumo de Energía en la Península de Yucatán	44
2.2. Generación de Energía en la Península de Yucatán	45
2.3. Índice de Balance	46
2.4. Curva de demanda horaria en la región peninsular durante enero y Julio del 2008	47
2.5. Curva de demanda horaria del SIN durante el 2015	47
3.1. Diagrama de Kiviat de las ponderaciones por asignación directa y metodología tipo AHP	56
4.1. Diagrama de flujo para la selección de sitio de una instalación nuclear	66
4.2. Zonas de inundación en la península de Yucatán	68
4.3. Red Nacional de Caminos en la península de Yucatán	69
4.4. Capacidad de los enlaces de transmisión en la península de Yucatán	69
4.5. Mapa de la península de Yucatán	70
4.6. Mapa de México con la densidad de población de las principales poblaciones	71
4.7. Áreas Naturales Protegidas en la península de Yucatán	72
4.8. Principales parques industriales en la península de Yucatán	73

---

4.9. Trayectorias de los ciclones tropicales en la península de Yucatán de 1851 a 2017 74

## Índice de tablas

1.1.	Neutrones liberados durante la fisión de distintos elementos	10
1.2.	Energía liberada durante una reacción de fisión	11
1.3.	Distribución de la energía liberada durante la fisión del U-235	12
1.4.	Tipos de reactores nucleares	21
1.5.	Factores de Calidad de diferentes tipos de radiación	24
1.6.	Dosis de radiación ionizante recibida al año por diferentes fuentes	25
1.7.	Comparación de fatalidades inmediatas en accidentes severos entre 1962 y 2000	27
1.8.	Costos instantáneo de inversión y nivelado de generación de diferentes fuentes de energía	32
1.9.	Costo nivelado de generación considerando externalidades	33
1.10.	Estimaciones promedio de las emisiones de CO <sub>2</sub> de diversas tecnologías de generación de electricidad durante su ciclo de vida	36
1.11.	Intensidad de uso de suelo por fuente de energía, estimada para 2030	36
2.1.	Participación por tecnología en la capacidad instalada en la península de Yucatán en 2015	45
2.2.	Participación por tecnología en la capacidad instalada en la península de Yucatán en 2030	46
3.1.	Ponderación de criterios utilizando asignación directa	54
3.2.	Valores para comparación por pares	55
3.3.	Ponderación de criterios utilizando una metodología tipo AHP	55
3.4.	Ambos Métodos	56
5.1.	Resultados del WSM para los Reactores Avanzados	77
5.2.	Resultados del WPM para los Reactores Avanzados	77
5.3.	Resultados del WSM para SMRs	77
5.4.	Resultados del WPM para SMRs	77
5.5.	Resultados del WSM para todos los reactores	78
5.6.	Resultados del WPM para todos los reactores	78
A.1.	Proyectos de adición de capacidad en la región peninsular	82

---

B.1. Matriz de datos de las alternativas y criterios como indica la ecuación 7	84
--	----

## Introducción

El ser humano ha logrado desarrollar tecnología para el aprovechamiento de la energía nuclear de manera exitosa en áreas como la investigación científica, la industria, la medicina, la propulsión naval y la generación de energía eléctrica, entre otras; obteniendo grandes beneficios para la sociedad. Uno de sus usos más conocidos y controvertidos es la producción de electricidad, siendo una fuente de energía sin emisión de gases de efecto invernadero durante la generación de electricidad y con pocas emisiones durante el ciclo de vida, que ha formado parte de la matriz energética de muchos países desde hace algunas décadas.

### 1. Desarrollo Histórico de la Energía Nuclear

El estudio de la radiación atómica y las transformaciones nucleares se inició a partir del descubrimiento de los rayos X, realizado en 1895 por Wilhelm Röntgen. Durante el primer tercio del siglo XX se llevaron a cabo una serie de experimentos que permitieron entender mejor la estructura atómica, como el descubrimiento de Rutherford en 1919 de que a pesar de que el núcleo está compuesto por partículas unidas por fuerzas de gran magnitud, se pueden inducir las transmutaciones nucleares (Murray y Holbert, 2015). En 1938 y 1939, Lise Meitner (PBS, 2006), Otto Hahn y Fritz Strassmann demostraron la existencia de la fisión nuclear (división del núcleo debido a la captura de un neutrón), indicando que en este proceso no solamente se libera una gran cantidad de energía, sino también neutrones adicionales que podrían causar una reacción en cadena (WNA, 2014). El conocimiento de este proceso causó agitación en la actividad de muchas universidades de Estados Unidos, logrando que para 1940 aparecieran alrededor de 100 artículos científicos y pronto se encontraron todas las características cualitativas de la reacción en cadena (Murray y Holbert, 2015).

El Comité de Aplicaciones Militares de Detonación de Uranio (*MAUD committee*) de Inglaterra publicó en 1941 el reporte “Uso de uranio como fuente de potencia”, en el que concluía que controlando la fisión del uranio se podía aprovechar la energía calorífica generada para ser usada en máquinas, vislumbrando el gran potencial para usos no bélicos (WNA, 2014).

En 1942 se llevó a cabo la primer reacción nuclear en cadena controlada, en una pila de grafito experimental en la Universidad de Chicago. Lamentablemente, con la detonación de dos bombas nucleares, una en Hiroshima y una en Nagasaki, el mundo conoció el poder destructivo de la energía nuclear, dejándole un estigma que ha prevalecido en la sociedad hasta la actualidad y que ha dificultado la aceptación de sus aplicaciones pacíficas. En la actualidad, 56 países (de los cuales una tercera parte se encuentra en vías desarrollo) operan 240 reactores nucleares de investigación (WNA, 2016g).

El primer reactor nuclear que produjo electricidad fue uno de cría experimental, el *EBR-1*, que inició su operación en 1951 en Idaho, Estados Unidos. La planta nuclear *APS-1*, que tenía reactor de producción de plutonio *AM-1* modificado para generar 5 MWe, fue

la primera usada para proveer de electricidad para uso comercial a partir de 1954 en la Unión Soviética (WNA, 2014). En 1953 el presidente de Estados Unidos, Eisenhower, dio un discurso titulado “Atoms for Peace” (Átomos para la paz) en el que señalaba el peligro de una guerra nuclear y propuso la creación de una “Agencia de Energía Atómica”, en respuesta a lo cual la Organización de las Naciones Unidas estableció la Agencia Internacional de Energía Atómica (IAEA, International Atomic Energy Agency), cuyo objetivo es “acelerar y aumentar la contribución de energía atómica para la paz, salud y prosperidad del mundo” (Murray y Holbert, 2015). El primer submarino nuclear fue el *USS Nautilus*, lanzado en 1954. La primera planta nucleoelectrónica diseñada a gran escala fue *Calder Hall-1* en Inglaterra, con una potencia de 50 MWe y puesta en marcha en 1956 (European Nuclear Society, 2016).

Debido al éxito obtenido en el desarrollo de las primeras centrales nucleoelectrónicas comerciales en Estados Unidos, especialmente por parte de las empresas Westinghouse y General Electric, las compañías de electricidad empezaron a ordenarlas y para los años de 1965 a 1970 aumentaron a aproximadamente 88,000 MWe, que era más de la tercera parte de todos los proyectos, incluyendo los de combustibles fósiles (Murray y Holbert, 2015).

La industria nuclear sufrió una etapa de estancamiento y disminución desde finales de los 70's hasta alrededor del 2002, pero el primero de la tercera generación de reactores, “Kashiwazaki-Kariwa 6”, se comisionó a finales de los 90's y fue una señal de la recuperación venidera (WNA, 2014). Esta disponibilidad de una nueva generación de reactores nucleares, que cuenta con 4 diseños en operación, 6 en construcción y otros en desarrollo (IAEA, 2013; WNN, 2016), coincide con la combinación de diversos factores como el incremento en la demanda de energía en el mundo (especialmente en países en vías de desarrollo), la conciencia de la importancia de la seguridad energética y la necesidad de limitar las emisiones de carbono, los cuales han revivido las expectativas de la energía nuclear (WNA, 2014).

## 2. Energía Nuclear en el Mundo

Además de los nuevos diseños, se ha mejorado el desempeño de los reactores nucleares existentes. Entre 1990 y el 2010 hubo un aumento en la producción de energía por medios nucleares de 40 %, de los cuales el 36 % de este se debió a nuevas unidades, mientras el 7 % a repotenciacines y 57 % a incrementos en la disponibilidad (WNA, 2016g). El factor de capacidad promedio a nivel mundial entre el 2012 y 2014 fue de 74.6 % y en Estados Unidos fue de 89.5 % (IAEA, 2017), pero el factor de planta en el 2015 fue de 91.9 %, con centrales que alcanzaron hasta 102.6 % (NEI, 2016b).

Actualmente hay 30 países operando en total 446 reactores nucleares dedicados a la generación de electricidad<sup>1</sup>, 14 de los cuales dependen de la energía nuclear para al menos una quinta parte de su electricidad, con una capacidad total instalada de más de 383,000 MWe (IAEA, 2017). Casi el 11 % de la electricidad consumida en el mundo durante el 2013 provino de fuentes nucleares (IEA, 2015a) y existe una experiencia de más de 16,500 años-reactor (WNA, 2016g). Existen también 157 reactores apagados permanentemente en 19 países (IAEA, 2017).

Además existen planes de aumento en la capacidad nuclear, principalmente en China, India y Corea del Sur (WNA, 2014), con 67 reactores en construcción en 15 países (IAEA,

---

<sup>1</sup>Aunque existen reactores para investigación, producción de isótopos y propulsión naval, de aquí en adelante hablaremos de aquellos cuyo objetivo es la producción de electricidad a menos que se especifique lo contrario.

## Introducción

2017) y algunos programas para incrementar la potencia de centrales nucleoelectricas existentes. En total, hay planes para más de 160 reactores nucleares con una capacidad total de unos 186,000 MWe y se han propuesto más de 300 (WNA, 2015i).

En Estados Unidos hay 100 reactores nucleares, que generaron casi el 20 % de la electricidad en el 2016 (IAEA, 2017). Estado Unidos es el más grande productor de nucleoelectricidad, con más del 30 % de la generación total a nivel mundial y se espera que 4 nuevas unidades entren en operación antes del 2021 (WNA, 2017e). Francia cuenta con 58 reactores que generaron el 71.61 % de su electricidad durante el 2017, siendo el segundo país con mayor número de reactores en el mundo y el que mayor participación de energía nuclear tiene en su matriz energética (IAEA, 2017). Además es el más grande exportador de energía eléctrica del mundo debido al bajo costo de generación de sus centrales, con lo que obtiene ganancias de más de tres mil millones de euros al año y aproximadamente el 17 % de la electricidad es generada con combustible nuclear reciclado (WNA, 2017c). A pesar de que actualmente tiene planes para reducir la proporción en la generación a un 50 % para el 2025, tiene un reactor tipo EPR en construcción (WNA, 2017c).

Japón es el tercer país con mayor número de reactores nucleares, con 48 y 2 en construcción (WNA, 2017d). Después del accidente de Fukushima, todos los reactores en Japón fueron apagados poco a poco, lo cual ocasionó problemas ya que aportaban alrededor del 30 % de la electricidad del país. Como consecuencia, debieron importar alrededor del 84 % de sus necesidades energéticas (WNA, 2017d), además de generar un gasto de treinta mil millones de dolares anuales debido a la importación de combustibles y aumentar las emisiones de dióxido de carbono a un 10.8 % más que en 1990 (eliminando los logros en los objetivos del 2010 en el protocolo de Kyoto (WNN, 2015)). Desde entonces, 5 reactores han reiniciado su operación bajo las nuevas regulaciones de seguridad, y se espera que 10 más lo hayan hecho para finales de marzo de 2018 (WNN, 2017a).

China es el país que cuenta con mayor número de reactores en construcción, con 24, y tiene 31 reactores en operación que generaron el 2.4 % de su energía eléctrica en el 2014 (IAEA, 2017). Además existen planes para la construcción de más reactores, con el fin de tener una capacidad instalada de 150GWe para el 2030 debido al ímpetu de incremento del aprovechamiento de la energía nuclear causado por la contaminación del aire generada por las centrales de carbón, consiguiendo volverse bastante autosuficiente en el diseño y construcción de reactores y otros aspectos del ciclo de combustible, aprovechando la tecnología occidental con adaptaciones y mejoras (WNA, 2017b).

**2.1. Países Emergentes.** Más de 20 países que no tienen ninguna central nucleoelectrica tienen planes de utilizar la energía nuclear, y una cantidad similar lo está considerando en algún nivel que no necesariamente involucra al gobierno. Aunque no se espera que esto contribuya mucho en la expansión de capacidad nuclear a corto y mediano plazos, a largo plazo la urbanización en los países menos desarrollados aumentará el consumo de electricidad, especialmente la de carga base que puede ser producida por medios nucleares (WNA, 2016b). En Bielorrusia (país cuya frontera con Ucrania se encuentra muy cerca de Chernóbil) y los Emiratos Árabes Unidos ya hay reactores en construcción, mientras en Lituania, Turquía, Bangladesh y Vietnam hay contratos firmados y tienen infraestructura legal y regulatoria desarrollada o en desarrollo (WNA, 2016b). Los Emiratos Árabes Unidos tienen un programa nuclear con cuatro unidades en construcción actualmente, esperando que la primera entre

en operación en el 2017 y contar con una capacidad total de 5.6 GWe para el 2020 (WNA, 2015f). En Bielorrusia se está construyendo su primera planta nuclear con financiamiento ruso, la cual contará con dos reactores que tendrán una capacidad total de 2,400 MWe y se espera que empiece a operar en el 2018 (WNA, 2015d). Lituania cerró su última central nuclear que había estado generando el 70 % de su electricidad en el 2009 debido a presiones de la Unión Europea pero tiene planes de que GE Hitachi construya una nueva (WNA, 2016f), en Turquía se realizaron las solicitudes para la construcción y licencia de operación de una planta nuclear con cuatro reactores que se espera se empiece a construir este año, además de tener entre los planes la construcción de otras dos (WNA, 2015g), Bangladesh planea tener en operación dos reactores nucleares para el 2022 (WNA, 2015c), y Rusia y Japón acordaron financiar y construir 2400 MWe y 2000 MWe de capacidad nuclear respectivamente en Vietnam (WNA, 2015h). En América, Chile tiene planes bien desarrollados pero aún no hay compromisos, en Venezuela, Bolivia y Perú se discute como una opción seria, y en Cuba y Paraguay oficialmente no es una opción política en el presente (WNA, 2016b).

**2.2. Energía Nuclear en México.** La inmersión formal en México en la ciencia y tecnología nuclear se debe al entusiasmo de algunos investigadores, entre los que destaca el Dr. Nabor Carrillo Flores y tiene lugar el 1° de enero de 1956 con la fundación de la Comisión Nacional de Energía Nuclear, que cubría dos campos de interés: Aplicaciones energéticas y no-energéticas, y Estudios en ciencias nucleares (ININ, 2016). En 1966 se iniciaron algunos estudios para la identificación de sitios potenciales en los que se pudieran ubicar plantas nucleoelectricas, para tomar la decisión de construir la única hasta la fecha en 1972 y empezar a hacerlo en 1976 (WNA, 2015e). En la actualidad México cuenta con 2 reactores nucleares modelo BWR-5 en la central nucleoelectrica Laguna Verde, Veracruz, que iniciaron su operación comercial en 1990 y 1995 (IAEA, 2017), con una generación de electricidad de 5.57 %, 4.89 % y 6.13 % del total nacional en los primeros tres años de operación conjunta (INEGI, 2010a). Durante el 2014 fue de 5.64 % con una producción neta de 9,311.61 GWh (IAEA, 2017), después de una repotenciación realizada entre los años 2008 y 2011 con la que alcanzaron una potencia neta de aproximadamente 800 MWe cada uno (WNA, 2015e).

### 3. Energía Nuclear en el Futuro

En la actualidad el mundo mira nuevamente a la energía nuclear como una opción. Algunos de los factores que conducen la expansión nuclear son: El incremento en la demanda mundial, incluyendo la sustitución de nuevas centrales eléctricas, la necesidad de desalinización de agua y el uso de los vehículos eléctricos que incrementará el consumo nocturno aumentando la proporción de carga base; La atención en las agendas políticas en la seguridad del suministro; El intento de reducir el uso de combustibles fósiles debido a la consciencia de los posibles efectos del cambio climático, que requiere del uso de energía nuclear debido a que es la única alternativa disponible actualmente a gran escala, continua y confiable; El incremento en los costos de los combustibles fósiles, a pesar de los precios bajos de gas temporales; La estabilidad en los costos finales de producción respecto al precio del combustible de las centrales nucleoelectricas; Y la necesidad de estabilidad en la red de transmisión debido al efecto de la intermitencia de las energías renovables que requiere de un suministro estable para la carga base (WNA, 2015j).

Existe también una cuarta generación de reactores nucleares en etapa de planeación que se espera se encuentren disponibles a largo plazo y son desarrollados por el Gen IV International Forum (GIF). Este tiene sus orígenes la propuesta del U.S. Department of Energy de empezar discusiones con colaboración internacional sobre el desarrollo de los reactores de cuarta generación, y actualmente cuenta con 13 miembros (GIF, 2016). Se espera que estos reactores estén listos entre el 2020 y 2030 (WNA, 2015b). Se plantearon 8 objetivos para los nuevos diseños en las áreas de sustentabilidad, economía, seguridad y confianza, y resistencia a la proliferación y protección física: De la primer área se espera que provean de energía sustentable y minimización de los residuos; en la segunda se espera que tenga una ventaja clara del costo en el ciclo de vida sobre otras fuentes y un riesgo de financiamiento comparable; sobre la tercera deben ser excelentes en seguridad y confianza, tener una muy baja probabilidad y grado de daño al núcleo, y no tener necesidad de respuesta fuera del sitio en situación de emergencia; y para la última deben garantizar no ser atractivos para el desvío o robo de material para armas nucleares y proveer mejoras en la protección contra actos de terrorismo (GIF, 2016).

**3.1. Propuestas de Energía Nuclear en México.** En México ya se ha planteado la necesidad de hacer estudios de viabilidad para la incorporación gradual de nuevas centrales nucleares (SENER, 2012), una propuesta tecnológica y definir el alcance de dicho programa para cumplir con los compromisos establecidos de reducción de emisiones de carbono y participación de combustibles fósiles (SENER, 2013). En los sectores académico y de investigación y desarrollo existen algunos trabajos que indican que la energía nuclear sería una opción adecuada para reducir las emisiones de dióxido de carbono de manera sustentable, cumpliendo con los criterios económicos, sociales y ambientales, además de propuestas específicas de tecnología en sitios potenciales. Dzib Quijano (2007) determinó que la energía nuclear en el país es sustentable y segura, y Ramírez Galicia (2009) concluyó que es viable. Esta es más competitiva para menores tasas de descuento y ante aumentos en el costo de gas natural (Sosa Palacios y Trejo Galicia, 2004; Bárcena Zubieta, 2012) y especialmente cuando se incluyen penalizaciones por emisiones de CO<sub>2</sub> (Bárcena Zubieta, 2012). El uso de energía nuclear en México además implicaría una reducción en las emisiones de dióxido de carbono (Alonso Vargas, Ramírez Sánchez, y Palacios Hernández, 2011; Castrejón Botello, 2012) y utilizando bonos por emisiones evitadas de \$40 USD por tonelada y/o una reducción en la tasa de descuento, es viable económicamente (Castrejón Botello, 2012). Esto también se puede lograr por medio de costos altos por emisiones de dióxido de carbono, logrando que la energía nuclear sea la más barata para carga base con cargos de entre \$50-75 USD por tonelada. Rodríguez Ángel (2013) utilizó el programa DEEP para hacer una evaluación de un sistema dual de generación eléctrica y desalinización de agua de mar, concluyendo que el uso de energía nuclear resulta ser la opción más económica.

Otro aspecto que ha sido considerado es la elección de la tecnología de reactores nucleares más adecuada para el país, utilizando diferentes criterios en las propuestas elaboradas. Entre estos criterios se encuentran potencia eléctrica, eficiencia, factor de disponibilidad, tiempo de construcción, vida útil, experiencia en el país, estado de desarrollo, generación de empleos, costo de inversión, costo de operación y mantenimiento, costo de combustible, costo nivelado de generación, frecuencia de daño al núcleo, frecuencia de grandes liberaciones de radionúclidos, quemado de combustible, posibilidad de reprocesamiento de combustible,

dosis a los trabajadores y emisiones al aire. Sosa Palacios y Trejo Galicia (2004) concluyeron que respecto a cuestiones económicas resulta mejor el diseño de un reactor BWR de 1350 MW aunque el AP600 tiene una menor emisión de radionúclidos al ambiente, sin embargo Bárcena Zubieta (2012) encuentra que económicamente es más adecuado el ACR700. Jurado Pineda (2005) usa la metodología del documento Costos y Parámetros de Referencia (COPAR) de la CFE para comparar los diseños ABWR y EPR resultando mejor el segundo. Uresti Chávez (2005) recomienda el diseño ABWR. Salazar Moreno (2010) propone el uso de 41 reactores ACR-1000. Leal Cobos (2009) utiliza el modelo WASP-IV y concluye que el mejor escenario de expansión se da utilizando reactores ESBWR. Algunos trabajos utilizan diferentes métodos de toma de decisiones multicriterio, como Normalización, Ponderación lineal, Producto ponderado, Lógica difusa, Proceso de análisis jerárquico, ELECTRE y TOPSIS. El resultado de Barragán Martínez (2008) indica que la mejor opción es el reactor PBMR y Espinosa Sosa (2010) obtiene al reactor ABWR como el mejor posicionado.

Respecto al sitio, también se han realizado propuestas considerando consumo y demanda esperados en el futuro, crecimiento poblacional, sismicidad, huracanes, actividad volcánica, tipo de suelo y disponibilidad de agua, entre otros. Entre las propuestas son el estado de Veracruz (Jurado Pineda, 2005) y estados del norte, específicamente Sonora (Jurado Pineda, 2005; Uresti Chávez, 2005; Rodríguez Ángel, 2013) y Tamaulipas (Ramírez Galicia, 2009). En estos análisis, los estados de la península de Yucatán son excluidos debido a que se estima que el crecimiento de las necesidades de energía eléctrica es menor al de los estados del norte que tienen un mayor desarrollo industrial (Jurado Pineda, 2005), que se encuentran cerca de una zona en la que hay disponibilidad de hidrocarburos (Uresti Chávez, 2005), que no presenta problemas con el suministro de agua (Rodríguez Ángel, 2013) o cuestiones climatológicas (Ramírez Galicia, 2009). Respecto al último criterio es necesario mencionar que las centrales nucleares están diseñadas para hacer frente a fenómenos naturales como los huracanes y existen procedimientos de seguridad específicos para estos eventos (Foro Nuclear, 2016). En Estados Unidos las centrales nucleares han resistido con éxito diferentes desastres naturales (NEI, 2016a), entre ellos algunos huracanes como el del 2012 llamado Sandy, de categoría 3, en el que 34 centrales nucleares que se encontraban en su trayectoria respondieron de manera adecuada y en el 2005 Katrina, de categoría 5, durante el que se apagó sin peligro un reactor (NEI, 2012).

#### **4. Objetivos**

Con base en los resultados de los trabajos mencionados, en esta tesis se supone como premisa principal que el uso de energía nuclear es viable en México. Nuestro objetivo es proponer la tecnología y el sitio para el aprovechamiento de la energía nuclear en la generación de electricidad en la península de Yucatán a mediano y largo plazos, con el fin de impulsar el desarrollo de la seguridad energética de la región. Para esto es necesario determinar si las condiciones son adecuadas para su uso a nivel regional, comparar los diferentes diseños de reactores nucleares disponibles en el mercado con el fin de seleccionar el más adecuado e identificar los posibles sitios para la construcción de centrales nucleares.

#### **5. Estructura de la Tesis**

Para esto, la tesis se estructura de la siguiente manera:

## *Introducción*

---

En el primer capítulo se presentan algunos aspectos del uso de la energía nuclear para la producción de electricidad, como su funcionamiento, seguridad, impacto ambiental y economía. En el capítulo dos se analizan las condiciones para la construcción de una central nuclear en la península de Yucatán, incluyendo el marco legislativo, las necesidades energéticas, políticas y tecnológicas y la aceptación social. En el tercer capítulo se seleccionan los diseños de reactores a analizar, se presentan sus características y se comparan por medio de dos métodos de toma de decisiones multicriterio. En el capítulo cuatro se presentan los requisitos de un sitio para la construcción de una central nucleoelectrica y se estudian las características de la península de Yucatán para identificar aquellos que sean potencialmente adecuados. En el capítulo cinco se discuten los resultados obtenidos, se elabora una propuesta tecnológica y de sitio, y se presentan las conclusiones a las que se llegó en este trabajo.

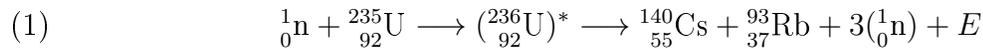
## La Nucleoelectricidad

En este capítulo se exponen algunos aspectos fundamentales del uso de energía nuclear para la generación de electricidad con el fin de entender a grandes rasgos su funcionamiento, los componentes básicos de una central nuclear, el ciclo de combustible, los mecanismos de seguridad y los costos. Además, para valorar mejor el uso la energía nuclear se presenta una comparación con otros tipos de centrales eléctricas.

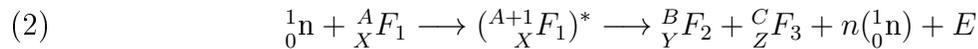
### 1. Principios Físicos

El proceso de producción de electricidad en las centrales nucleares es muy similar al de cualquier termoeléctrica<sup>1</sup>. Se realiza una conversión de energía calorífica a energía mecánica en una turbina, que puede ser de gas (ciclo Brayton) o vapor (ciclo Rankine), para posteriormente convertirla en energía eléctrica usando un generador. La principal diferencia radica en la fuente de calor, que mientras en las termoeléctricas es la combustión de hidrocarburos, en las centrales nucleares se aprovecha la fisión nuclear. Ahora procederemos a describir el proceso de fisión nuclear y los principios básicos de funcionamiento de un reactor nuclear.

**1.1. Fisión Nuclear.** La fisión nuclear es la división de un núcleo atómico en dos o más núcleos de menor masa, llamados productos de fisión, durante la que además se liberan neutrones y energía. Esta se presenta en núcleos pesados y puede darse de forma espontánea o ser inducida por la absorción de un neutrón. En la fisión inducida, este proceso inicia con la absorción de un neutrón (en algunos casos se puede producir por la absorción de otro tipo de partículas o de fotones de alta energía), con lo que el núcleo, ahora denominado núcleo compuesto, queda en estado excitado para posteriormente dividirse. Un ejemplo de una reacción típica de fisión es la siguiente (DOE, 1993):



En esta, un átomo de uranio absorbe un neutrón, quedando el núcleo en estado excitado debido al excedente de energía, para posteriormente dividirse en uno de cesio y uno de rubidio, liberando tres neutrones y energía. Esto se puede expresar de manera general para la fisión como se muestra en la ecuación 2.



donde  $A + 1 = B + C + n$  y  $X = Y + Z$ .

La liberación de energía se debe a que la masa de los núcleos atómicos es menor que la suma de las masas de sus constituyentes por separado (protones y neutrones, denominados ambos nucleones). Esta diferencia, conocida como defecto másico, es el equivalente a la

---

<sup>1</sup>Existen otros métodos para obtener energía eléctrica a partir de material radiactivo pero son poco utilizados y no se consideran en este trabajo.

## La Nucleoelectricidad

energía requerida para separar todo el núcleo en dichos componentes. Al dividir la energía equivalente del defecto másico entre el número de nucleones se obtiene la *energía de enlace por nucleón*, que varía para diferentes núcleos. A mayor energía de enlace por nucleón, mayor es la estabilidad del núcleo. En la Figura 1.1 se presenta una gráfica de la energía de enlace por nucleón para diferentes elementos según el número de nucleones. Se puede observar que iniciando desde el hidrógeno, la energía de enlace por nucleón va en aumento hasta llegar a su máximo aproximadamente en el hierro, a partir de donde empieza a disminuir. Esto implica que es posible liberar energía al fusionar dos núcleos ligeros, con la condición de que la suma de la masa de los núcleos debe ser mayor que la del núcleo resultante. A este proceso se le denomina *fusión nuclear*, y aunque el humano todavía no ha desarrollado la tecnología para controlarlo, es el que da vida a las estrellas, incluyendo al sol. Para que la fisión nuclear libere energía, la masa del núcleo fisionado debe ser mayor que la de los productos.

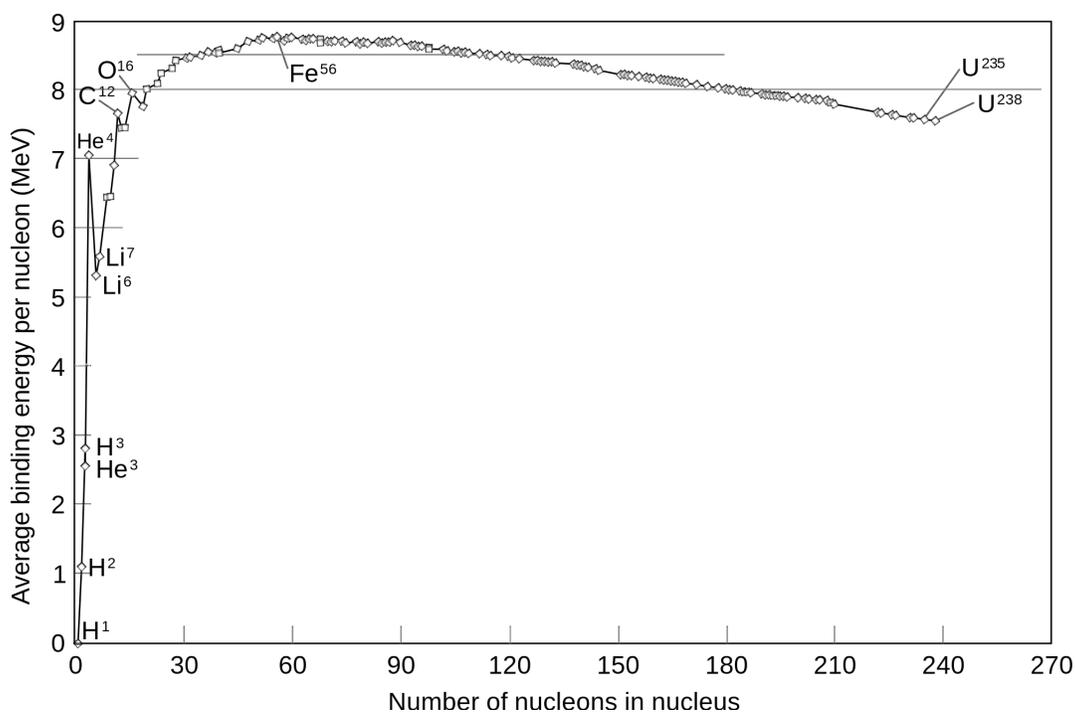


FIGURA 1.1. Energía de Enlace por Nucleón (Wikimedia Foundation, nodate).

Los dos núcleos resultantes de la fisión de un elemento no son siempre los mismos pero presentan una distribución de probabilidad en función del número másico, la cual depende de la energía del neutrón incidente, como se puede observar en la Figura 1.2 para neutrones térmicos y con 14 MeV<sup>2</sup>.

El número de neutrones producidos durante la fisión se encuentra en el rango de 1 a 7, con un promedio de alrededor de 2.5, dependiendo del elemento y la energía del neutrón que la provocó. En la Tabla 1.1 se puede ver este valor para algunos elementos y tipos de fisión.

<sup>2</sup>El electrón voltio es una unidad de energía usada comúnmente en física nuclear, definida como “la energía proporcionada a un electrón al acelerarlo a través de 1 V de diferencia de potencial eléctrico” y equivale a  $1.6 \times 10^{-19}$  J (Nave, 2016) de energía.

Esto tiene implicaciones importantes para el aprovechamiento de esta reacción ya que hace que sea posible una reacción en cadena autosustentada.

Núcleo	Tipo de fisión	Neutrones producidos (promedio)
Th-232	Rápida	2.456
U-233	Térmica	2.497
U-235	Térmica	2.436
U-238	Rápida	2.819
Pu-239	Térmica	2.884

TABLA 1.1. Neutrones liberados durante la fisión de distintos elementos (Murray y Holbert, 2015).

**1.2. Reacción en Cadena.** La fisión nuclear puede ser inducida por la interacción entre un neutrón y un núcleo, con la posible liberación de más neutrones, por lo que estos pueden a su vez producir otras reacciones de fisión. A este proceso se le llama *reacción en cadena*. La razón entre el número de fisiones en una generación ( $n_1$ ) y el número de fisiones en la generación anterior ( $n_0$ ) se conoce como *Factor de Multiplicación*, siendo entonces

$$k = \frac{n_1}{n_0}$$

Si  $k > 1$ , el número de fisiones incrementa de una generación a otra y el sistema se considera *supercrítico*. Si  $k < 1$ , el número de fisiones disminuye y el sistema se denomina *subcrítico*. El sistema se conoce como *crítico* en el caso en el que  $k = 1$  debido a que el número de neutrones que causan fisiones se mantiene constante. En un sistema crítico se genera una

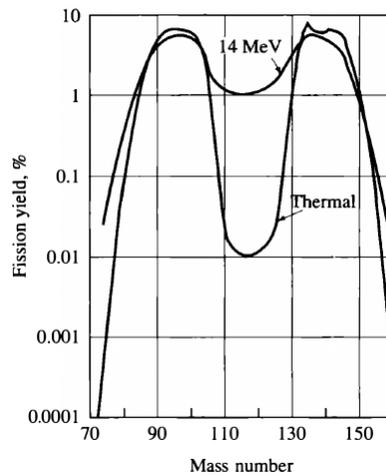


FIGURA 1.2. Productos de fisión para neutrones térmicos y de 14 MeV de energía del U-235 (Lamarsh y Baratta, 2001).

*reacción en cadena autosustentada* que no requiera de fuentes externas para mantenerse. En un reactor nuclear es posible controlar la potencia variando el Factor de Multiplicación.

Usando el Factor de Multiplicación se puede definir la *Reactividad*, que es la proporción de fisiones ganadas o perdidas de una generación a otra con respecto al número de fisiones en la generación presente, de la siguiente manera,

$$\rho = 1 - \frac{1}{k} = \frac{n_1 - n_0}{n_1}$$

La Reactividad es 0 cuando el sistema es crítico, por lo que puede indicar que tan alejado está un sistema de la criticalidad.

**1.3. Energía Liberada por Fisión.** La energía liberada durante la reacción proviene de la diferencia de masa entre los reactivos y los productos ( $\Delta m$ ), cuya equivalencia se da según la ecuación, descubierta por Albert Einstein,  $E = \Delta m \cdot c^2$ , en la que  $c$  es la velocidad de la luz en el vacío. En la Tabla 1.2 se puede ver el resultado del cálculo para la reacción presentada en la ecuación 1 como ejemplo. La mayor parte de la energía liberada es energía cinética de los fragmentos de la fisión. Posteriormente se libera más energía debido al decaimiento de los núcleos producidos, liberando aproximadamente 200 MeV totales durante todo el proceso. Las reacciones químicas suelen involucrar liberación o absorción de energía del orden de las transiciones electrónicas, unos 10 eV; por ejemplo la combustión del metano produce  $803 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$  (OSU, 2011) u 8.32 eV por molécula y la del carbón 4 eV (Buongiorno, 2010), con lo que se puede ver que las reacciones nucleares son del orden de  $10^7$  veces más energéticas.

Masa de los reactivos (u) <sup>3</sup>	Masa de los productos (u)
U-235 235.043924	Rb-93 92.1699
n 1.008665	Cs-140 139.90910
	3(n) 3.02599
236.05289 u	235.85208 u
Diferencia	0.200509 u
Equivalente en energía	<b>186.8 MeV</b>

TABLA 1.2. Energía liberada durante una reacción de fisión (DOE, 1993).

Conocer la manera en la que se distribuye la energía liberada permite distinguir que porción puede ser aprovechada por el ser humano y para que fines. En la Tabla 1.3 se muestra un ejemplo para el  $^{235}_{92}\text{U}$ . La parte superior de la Tabla indica la energía liberada de manera instantánea durante la fisión y la parte inferior muestra la energía liberada posteriormente en otros procesos, como el decaimiento de los subproductos de la fisión. También se presenta cuanta de esta energía es aprovechable. Se observa que casi toda la energía liberada se puede utilizar. Más del 80 % se libera en forma de energía cinética de los productos de fisión convirtiéndose en calor, y debido a que las partículas  $\beta$ , los rayos  $\gamma$  y los neutrones

<sup>3</sup>La masa está en unidades de masa atómica, unidad usada comúnmente en física nuclear, definida como un doceavo de la masa del  $^{12}_6\text{C}$  y equivalente a  $1.66054 \times 10^{-27}$  kg (Nave, 2016)

prácticamente no escapan del sistema, también es posible aprovechar su energía. Solamente la energía de los neutrinos emitidos durante el decaimiento  $\beta$  escapan del sistema debido a su poca interacción con la materia.

Forma	Energía liberada (MeV)	Energía aprovechable (MeV)
	Energía instantánea	
Productos de fisión (Cinética)	168	168
Neutrones (cinética)	5	5
Rayos $\gamma$	7	7
Total energía instantánea	180	180
	Energía retardada	
Rayos $\beta$	8	8
Rayos $\gamma$	7	7
Neutrinos	12	0
Captura de rayos $\gamma$	3 - 12	3 - 12
Total energía retardada	30 - 39	18 - 27
<b>Total</b>	210 - 219	198 - 207

TABLA 1.3. Distribución de la energía liberada durante la fisión del U-235 (Lamarsh y Baratta, 2001).

## 2. Elementos de una Central Nucleoeléctrica

En una central nucleoeléctrica, el combustible, compuesto de material radiactivo que llevará a cabo la reacción en cadena autosustentada, se encuentra en el núcleo del reactor. Esta reacción es controlada por medio de barras de control, el uso de un material moderador y absorbentes neutrónicos<sup>4</sup>. El calor es removido por medio de un refrigerante y llevado de manera directa o indirecta hacia la turbina.

La Figura 1.3 muestra un diagrama de las diferentes partes de una central nucleoeléctrica, algunas de las cuales se describen en esta sección.

**2.1. Reactor Nuclear.** Un reactor nuclear es un dispositivo diseñado para el control y aprovechamiento de la reacción de fisión nuclear. La Figura 1.4 muestra algunos de los componentes de un reactor nuclear que se describen a continuación.

*2.1.1. Núcleo del Reactor.* El núcleo del reactor es la región compuesta por el combustible, el moderador (si el tipo de reactor<sup>5</sup> lo requiere), el refrigerante y las barras de control. Además cuenta con un soporte para sostener estos elementos y permitir su movilidad en los casos en que es necesario. En el núcleo se deben crear las condiciones para mantener la criticidad.

<sup>4</sup>Sustancias no fisionables con gran capacidad de absorción de neutrones insertadas intencionalmente en algunos tipos de reactor con el fin de controlar la reactividad del combustible fresco (U.S.NRC, 2015)

<sup>5</sup>Los tipos de reactores nucleares se revisan en una sección más adelante

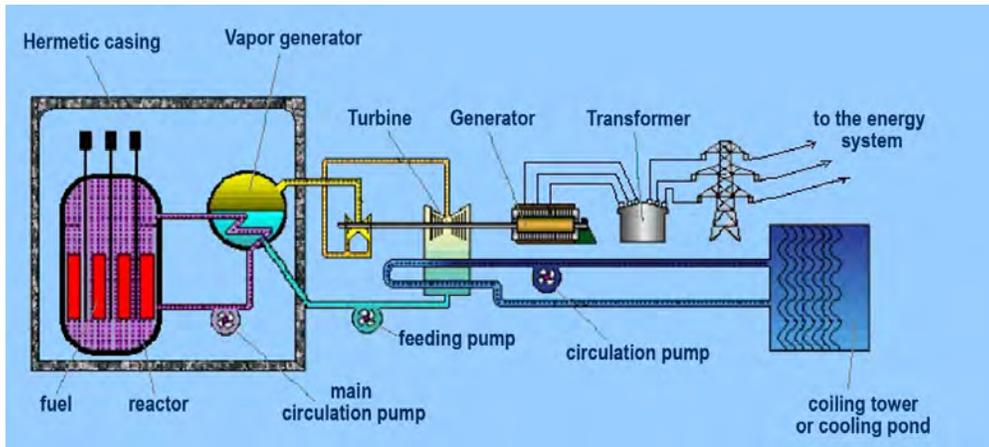


FIGURA 1.3. Componentes de una planta nuclear (Globalatom, 2017).

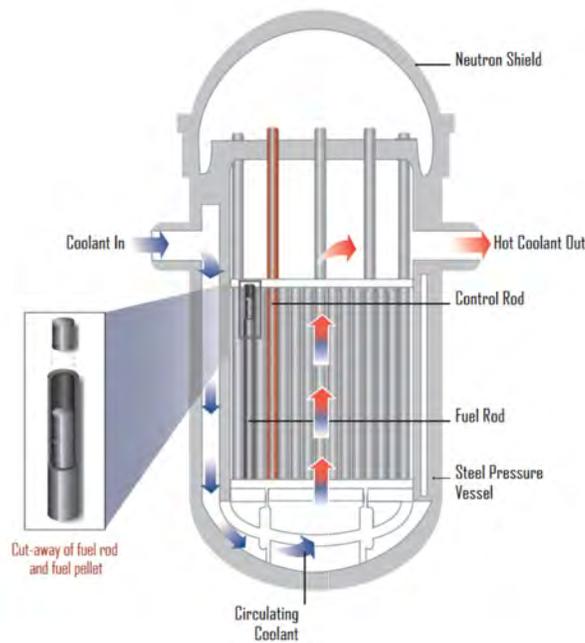


FIGURA 1.4. Componentes de un reactor nuclear (Smith, 2017).

**Combustible:** El combustible es el material en el que se lleva a cabo la fisión nuclear. Generalmente se trata de dióxido de uranio  $UO_2$  en forma de pastillas introducidas en tubos que se agrupan para formar ensambles. El diseño de los ensambles varía entre los modelos de reactores, con diferencias en el tamaño de los tubos o grados de enriquecimiento, incluyendo el uso de uranio natural, entre otros. Algunos reactores usan tubos presurizados (que permiten la recarga mientras el reactor sigue funcionando) o partículas recubiertas agrupadas en lugar de los ensambles.

**Refrigerante:** Es un fluido cuyo objetivo es remover la energía térmica del núcleo, para aprovecharla y evitar el sobrecalentamiento de sus componentes. Normalmente se trata de agua, *agua pesada*<sup>6</sup>, gases como el helio o sodio líquido. La mayoría de los reactores nucleares tienen forma cilíndrica y el refrigerante fluye de manera axial a través de canales en el núcleo del reactor.

**Moderador:** Su función es disminuir la energía de los neutrones permitiendo que generen reacciones de fisión en los materiales fisiles. Los materiales con números de masa pequeños son más efectivos para esto por lo que normalmente se usa agua (ligera o pesada)<sup>6</sup> que fluye a través de los elementos del combustible y la vez funciona como refrigerante, o bloques de grafito. Los reactores de neutrones rápidos no requieren de un moderador.

**Barras de control:** El núcleo del reactor además tiene canales ubicados estratégicamente para la inserción de las barras de control, que consisten de barras de materiales absorbentes de neutrones como boro, cadmio o hafnio. Su objetivo es controlar la reactividad del reactor permitiendo regular la potencia en el núcleo y apagar el reactor. Suelen ser cilíndricos o cruciformes. Además de las barras de control, existen otros métodos para controlar la potencia del reactor denominados sistemas de control secundario, como la mezcla de absorbentes de neutrones en el combustible y en el refrigerante.

2.1.2. *Envolvente.* Es una cubierta que se encuentra alrededor del núcleo en los reactores de cría y está compuesta por material fértil. Los neutrones que escapan del núcleo producen transformaciones nucleares con lo que se obtiene material fértil para su uso en combustibles. Debido a que entre estas reacciones se generan algunas fisiones, liberando una gran cantidad de energía, también se debe mantener refrigerada.

2.1.3. *Reflector.* Alrededor del núcleo (o de la envolvente, cuando está presente) se encuentra una capa de material moderador cuya finalidad es regresar una parte de los neutrones que escapan del núcleo hacia el mismo, reduciendo el requerimiento de combustible.

2.1.4. *Vasija.* Todos los elementos antes mencionados se alojan en la vasija del reactor, la cual puede estar presurizada. En algunos tiene un recubrimiento interno de un escudo térmico compuesto por material absorbente de rayos gamma para evitar el estrés térmico.

**2.2. Blindajes de Radiación.** Son materiales con la capacidad de absorber la radiación y que se colocan entre una fuente de radiación y lo que se quiere proteger. Todas las partes que contienen fuentes de radiación, incluyendo la vasija, están cubiertas por blindajes de radiación para seguridad del personal durante la operación normal de la planta.

**2.3. Estructura o Contención.** En la planta nuclear, el reactor se encuentra encerrado dentro de una estructura de contención que sirve para proteger a la población general en caso de accidente, especialmente si involucra la liberación de radionúclidos. Esta estructura puede cubrir al vasija y el sistema de suministro de vapor o estar dividida en una estructura primaria que cubre el reactor y una secundaria que coincide con el edificio del reactor.

---

<sup>6</sup> Agua con alto contenido de deuterio D<sub>2</sub>O. Al agua con bajo contenido de deuterio se le denomina *agua ligera* para diferenciarlas.

**2.4. Sistemas de Seguridad.** Las centrales nucleoelectricas cuentan con elaborados sistemas de seguridad para evitar accidentes y mitigar los danos en caso de que ocurran. Estos incluyen generadores de emergencia, valvulas para el alivio de presion, tanques de agua de reserva o sumideros de calor, bombas y aspersores, entre otros.

**2.5. Turbina.** Es una turbomáquina motora que se encarga de transformar la energía térmica generada por el reactor en energía mecánica. Suele utilizar como fluido de trabajo vapor de agua, siguiendo un ciclo Rankine, o gas, con un ciclo Brayton. El ciclo puede ser directo si el fluido que pasa por la turbina es el refrigerante del reactor, teniendo solamente un circuito, o indirecto, usando el fluido de un segundo circuito que recibe la energía del refrigerante a través de un intercambiador de calor.

**2.6. Generador Eléctrico.** Es la máquina que se encarga de transformar la energía mecánica proveniente de la turbina en energía eléctrica.

**2.7. Sistema Secundario de Enfriamiento.** Sistema encargado del enfriamiento del fluido proveniente de la turbina. Normalmente remueve la energía térmica por medio de un ciclo abierto de agua. Cuando existe una gran reserva de agua cercana a la central (como el mar o un río grande) esta se utiliza como fuente de agua, la cual luego es devuelta utilizando al reserva como sumidero térmico. En caso de no contar con una reserva de este tipo, se suministra agua que luego de cumplir su función pasa por torres de enfriamiento que utilizan la evaporación y convección (en menor grado) para reducir su temperatura, permitiendo su recirculación.

### 3. El Ciclo de Combustible

El uranio es un metal que se encuentra a nuestro alrededor, siendo más abundante que el oro, y tanto como el estaño o el zinc. La concentración en los mejores yacimientos es de 20,000 ppm y 0.0003 ppm en el agua de mar (Hore-Lacy, 2006), de donde se espera poder extraer en el futuro. Las reservas probadas de uranio con un costo menor a tres veces el actual son suficientes para el abastecimiento por unos 90 años (WNA, 2016k), pudiendo ser multiplicado decenas de veces con el aprovechamiento de fuentes de mayor costo, reutilización de combustible y el uso de reactores de cría.

El ciclo de vida del combustible nuclear inicia con la minería del uranio. Es extraído de la mena, después de ser molida; normalmente por medio de ácido sulfúrico y algún solvente o proceso de intercambio iónico. Después de ser secado se obtiene un polvo concentrado de óxido de uranio  $U_3O_8$ , que luego es reducido a dióxido de uranio. Debido a que el uranio natural tiene una concentración de 0.7 % del isótopo  $^{235}_{92}U$  (siendo el más abundante el  $^{238}_{92}U$ ), el cual es fisible, es decir que un neutrón térmico puede producir la fisión<sup>7</sup>, normalmente se requiere de un proceso de enriquecimiento que aumente la proporción de  $^{235}_{92}U$  a, típicamente, 3.5-5 %. En este punto el uranio puede ser usado como combustible para aquellos reactores que no requieren una mayor proporción de  $^{235}_{92}U$ .

Otra fuente de uranio son las reservas militares, enriquecido a más del 90 %, que puede ser diluido con uranio empobrecido. También el plutonio de grado militar puede ser usado para hacer combustible tipo MOX (del inglés *Mixed Oxide Fuel*).

---

<sup>7</sup>El  $^{238}_{92}U$  es fisionable, lo que significa que requiere de un neutrón con suficiente energía cinética para exceder la energía crítica de enlace.

Para el proceso de enriquecimiento se requiere que el uranio se encuentre en estado gaseoso por lo que es convertido en hexafluoruro. Este se lleva a cabo aprovechando las diferencias en las propiedades físicas de ambos isótopos ya que tienen propiedades químicas casi idénticas. Los dos métodos usados de manera comercial son por centrifugado y difusión gaseosa, aunque este último ya no se utiliza debido a su mayor consumo de energía. Otro método por medio de lasers está casi listo para su uso comercial. Después del enriquecimiento, el hexafluoruro se reconvierte en dióxido de uranio.

Normalmente los reactores nucleares utilizan ensambles de combustible que se componen de columnas de pastillas cerámicas del dióxido de uranio, selladas dentro de tubos de aleación de zirconio. Para la fabricación de las pastillas, el uranio es molido y mezclado con el fin de homogeneizar la distribución de tamaños de las partículas, se le agregan absorbentes neutrónicos quemables, lubricantes y otros aditivos, se les da forma y se hornean. Las pastillas tienen aproximadamente un centímetro de diámetro por uno de alto y cada una libera aproximadamente la misma energía que una tonelada de carbón (WNA, 2016e). Los tubos de combustible se ponen en estructuras en forma de ensambles, que varían según el tipo de reactor. Las mejoras en la producción del combustible han incrementado su quemado de 40 GWd/tU a 60 GWd/tU (WNA, 2016e).

La energía generada por tonelada de uranio natural, unos  $44 \frac{\text{TWh}}{\text{año}}$ , requeriría de la quema de 8.5 millones de metros cúbicos de gas natural o 20 mil toneladas de carbón (WNA, 2016l). Típicamente cada 18 meses, una tercera parte de los ensambles es reemplazada por combustible fresco, aunque la cantidad y tiempo de reemplazo puede variar en función del enriquecimiento del combustible utilizado.

Cuando el combustible es extraído del reactor, contiene alrededor de un 95 % de  $^{238}\text{U}$ , 1 % de  $^{235}\text{U}$ , 1 % de Pu y 3 % de productos de fisión<sup>8</sup> (WNA, 2016l). Debido a que este todavía emite radiación, se almacena cerca del reactor en piscinas, utilizando el agua como refrigerante y blindaje de radiación hasta que su actividad es reducida. Posteriormente puede ser reprocesado, almacenado en seco temporalmente o preparado para la disposición permanente.

En el reciclado se separa el uranio y el plutonio de los demás productos, para ser usados en combustible fresco. Los productos sobrantes son los desechos y pueden ser almacenados. Para un reactor de 1 GW, los desechos representan 750 kg al año (WNA, 2016l). El plutonio, después de ser separado, puede ser usado junto con uranio empobrecido como MOX o, si no se separa del uranio, en forma de mezcla regenerada (REMIX) rusa<sup>9</sup> en la que se combina con uranio enriquecido al 17 % (WNA, 2016l). El uranio 238 además puede ser usado en un futuro en reactores de neutrones rápidos. El uranio y plutonio separados disponibles actualmente equivalen a alrededor de tres años de suministro de uranio de las minas a nivel mundial (WNA, 2016d). El uranio recuperado debe ser enriquecido nuevamente para ser usado como combustible, pero debido a que contiene una mayor concentración de isótopos con gran probabilidad de absorción de neutrones como el uranio 234 y 236, requiere de un grado de enriquecimiento mayor (WNA, 2016d).

Los desechos de ciclo de combustible se clasifican en bajo, medio y alto nivel según la cantidad de radiación emitida. Los desechos líquidos del reprocesamiento pueden ser calentados

---

<sup>8</sup>98.8 %, 0.23 %, 0.38 % y 0.6 % respectivamente para reactores de agua pesada a presión que usan uranio natural como combustible (WNA, 2016l).

<sup>9</sup>Este método todavía no es comercial.

## La Nucleoelectricidad

hasta convertirlos en un polvo seco que posteriormente se mezcla con vidrio de borosilicato y se introduce en barriles de metal.

Algunos de los isótopos presentes en el combustible usado tienen una vida media larga, por lo que se pretende utilizar reactores de neutrones rápidos para transmutarlos en isótopos de vida media más corta, facilitando su disposición final (WNA, 2016h).

Se espera que los sitios de disposición final para los desechos sean profundos repositorios geológicos que podrían ser sellados. Aunque actualmente no se han construido estos sitios, no se debe a dificultades técnicas, sino al reducido volumen de desechos que hay actualmente en el mundo y que estos desechos podrían ser reprocesados en el futuro (WNA, 2016l) y son el combustible ideal para los reactores de generación IV.

La Figura 1.5 muestra un diagrama del ciclo de combustible descrito anteriormente.

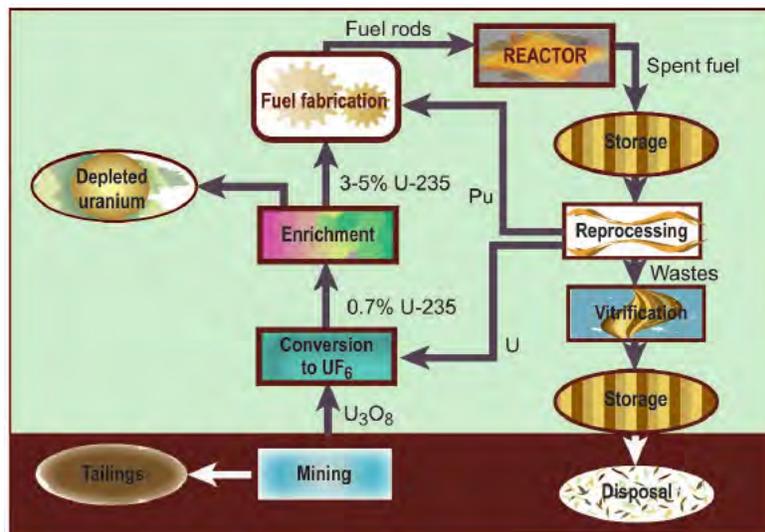


FIGURA 1.5. Ciclo del combustible nuclear (Hore-Lacy, 2006).

El reprocesamiento de combustible es sustentable según la definición de la WNA (2016h), que plantea que el manejo de los desechos nucleares lo es si:

- Cubre todos los pasos del manejo del combustible gastado desde la generación de los desechos hasta, incluyendo, la disposición final de acuerdo con un bien definido plan práctico.
- Prueba que es factible con un nivel de impacto sustentable.
- Incluye un plan de financiamiento realista.
- Puede demostrar de manera práctica que es viable técnica y económicamente.
- Protege la salud humana y el ambiente, y no tiene un impacto mayor en la salud de generaciones futuras que el que está permitido actualmente.
- Responde a una necesidad presente pero no impone cargas en futuras generaciones.

## 4. Tipos de Reactores Nucleares

Existen diversas formas de clasificar los reactores nucleares, tales como su propósito, energía de los neutrones, moderador, refrigerante, combustible, arreglo, los materiales estructurales y, combinando estas características, el concepto del reactor. Usando este último

criterio, revisaremos algunas características de los más importantes. En la Tabla 1.4 se encuentran algunas de las características de los tipos de reactores presentados.

**4.1. Reactor de Agua a Presión (PWR, Pressurized Water Reactor).** La electricidad se genera por medio de un ciclo Rankine indirecto en el que el refrigerante pasa por el núcleo para luego pasar (aún en estado líquido) a un intercambiador de calor en el que cede su energía para generar vapor en otro circuito, el cual después de ser secado va a la turbina. Debido a que requiere que la presión se mantenga estable para evitar la evaporación del agua, cuenta con un presurizador.

Este tipo de reactor es el más utilizado a nivel mundial, con más de 290 unidades operando para generación de electricidad (IAEA, 2017). En la Figura 1.6 se muestra un esquema de un reactor de este tipo.

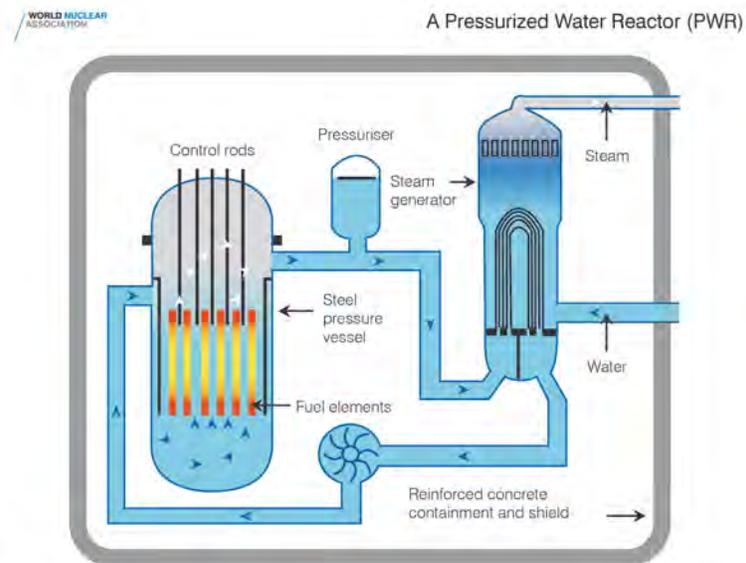


FIGURA 1.6. Esquema de un reactor de agua a presión (WNA, 2016[m]).

**4.2. Reactor de Agua en Ebullición (BWR, Boiling Water Reactor).** Utiliza un ciclo Rankine directo en el que el vapor es generado en el reactor, que tiene separadores y secadores de vapor, para ser llevado a la turbina.

Entre las ventajas que presenta se encuentran que requiere un menor flujo de agua ya que aprovecha el calor latente y el espesor de la vasija es menor ya que no trabaja a presiones tan altas. Aunque esto último conlleva un beneficio económico, este se pierde debido a que presenta una menor densidad de potencia por lo que se requiere de una vasija más grande. Una desventaja que presenta es que el agua se vuelve radioactiva al pasar por el núcleo por lo que todos los componentes por los que pasa el vapor deben tener blindajes de radiación.

Este compite en el mercado con el PWR, siendo el segundo más usado a nivel mundial para generación de electricidad, con más de 70 unidades en operación (IAEA, 2017). La Figura 1.7 es un esquema de un reactor de este tipo.

**4.3. Reactor de Agua Pesada a Presión (PHWR).** Son reactores que utilizan agua pesada como moderador y refrigerante, por lo que pueden usar como combustible uranio natural (no enriquecido). El uso de uranio natural reduce los costos de combustible y aumenta la energía producida por kg de uranio minado, pero incrementa los desechos producidos.

El moderador se encuentra en un tanque, denominado calandria, por el que pasan transversalmente canales presurizados en los que se aloja el combustible y fluye el refrigerante, por lo que se puede realizar la recarga del mismo sin necesidad de apagar el reactor. La Figura 1.8 es un esquema de este tipo de reactor.

**4.4. Reactor Enfriado por Gas (GCR, Gas Cooled Reactor).** Son reactores que utilizan otro gas diferente al vapor de agua como refrigerante. Pueden producir electricidad por medio de un ciclo Rankine indirecto usando un intercambiador de calor para generar vapor, o un ciclo Brayton directo pasando el refrigerante por una turbina de gas.

Una ventaja de este tipo de reactores es su alta eficiencia, de alrededor de 40 % pero el costo de generación resulta mayor. Además las turbinas de gas y los componentes que requieren son más compactos y las altas temperaturas utilizadas permiten aumentar la eficiencia usando el calor residual en otras aplicaciones. La Figura 1.9 muestra el esquema de este tipo de reactores.

**4.5. Reactor de Neutrones Rápidos (FR, Fast-neutron Reactor).** Este tipo de reactor no utiliza moderador ya que utiliza neutrones rápidos para producir la reacción en cadena. Puede ser utilizado para la producción de combustible nuclear generando más del que consume a través de una cobija de material fértil, en cuyo caso se le denomina reactor de cría, pero algunos están diseñados para consumir más material fisil que el que produce, incluyendo actínidos de vida larga y plutonio. Estas razones pueden justificar su uso a pesar

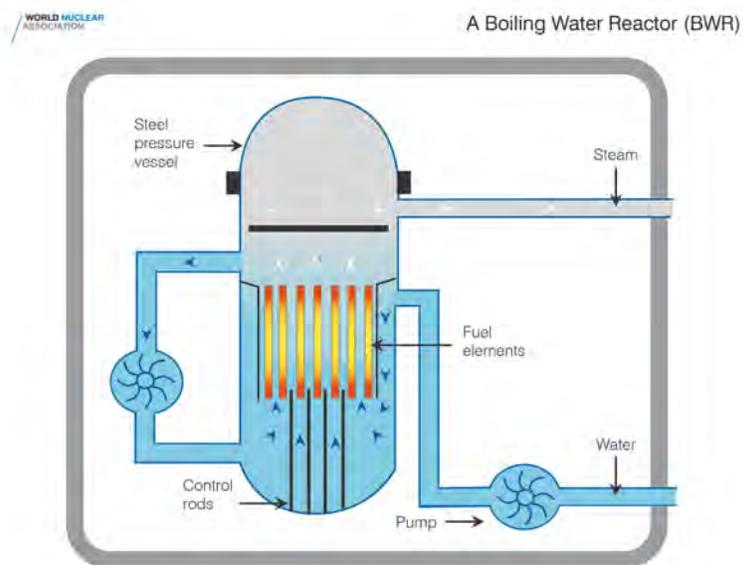


FIGURA 1.7. Esquema de un reactor de agua en ebullición (WNA, 2016[m]).

de que tienen la desventaja de ser más complicados y costosos de construir y operar(WNA, 2016c).

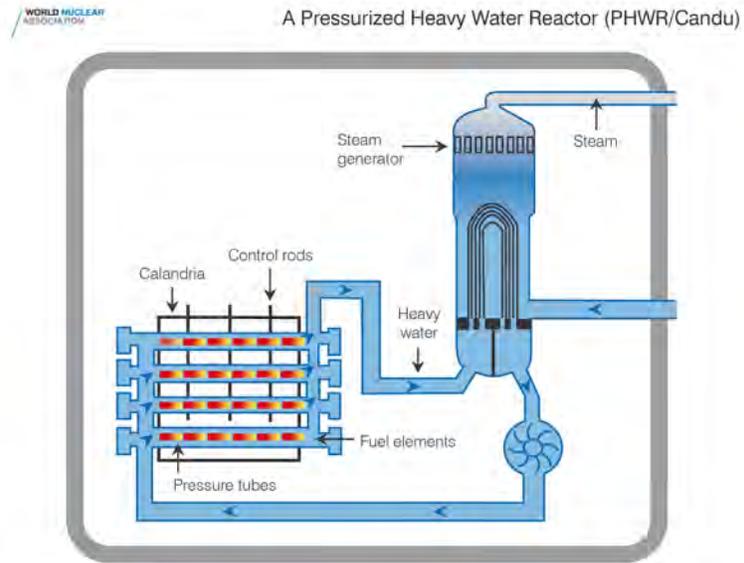


FIGURA 1.8. Esquema de un reactor de agua pesada a presión (WNA, 2016[m]).

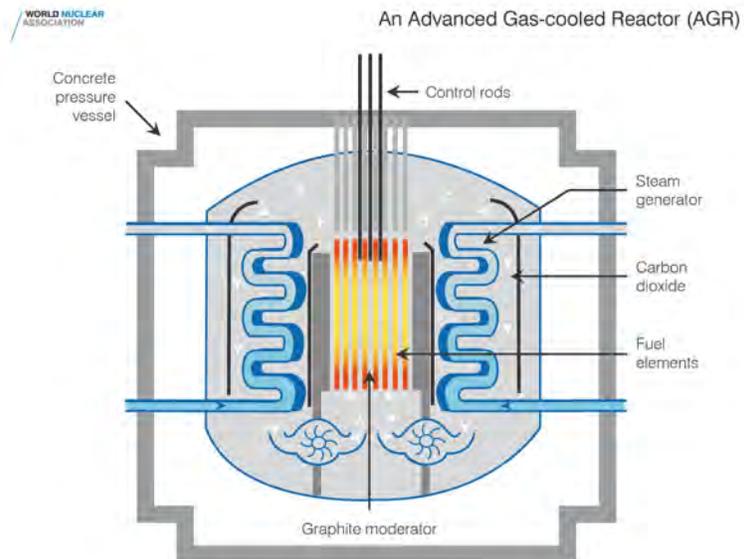


FIGURA 1.9. Esquema de un reactor avanzado refrigerado por gas. Créditos: Usuario Graevemoore(Wikimedia Foundation, nodate) a través de la licencia Attribution-Share Alike 3.0 Unported de Creative Commons.

Su coeficiente de reactividad por temperatura<sup>10</sup> es muy negativo, lo que representa una ventaja en la seguridad ya implica que al aumentar la temperatura disminuyen considerablemente las reacciones, siendo menos sensible a pérdidas de refrigerante. Otra ventaja en la seguridad al usar sodio es que se oxida al contacto con el aire produciendo humo blanco (peróxido de sodio) lo cual puede indicar la presencia de fugas, pero debido a la violenta reacción que tiene con el agua y que se transforma en un emisor beta al capturar un neutrón, requiere de un ciclo intermedio de sodio para evitar la interacción entre sodio radiactivo y agua. La Figura 1.10 muestra el esquema de un reactor de este tipo.

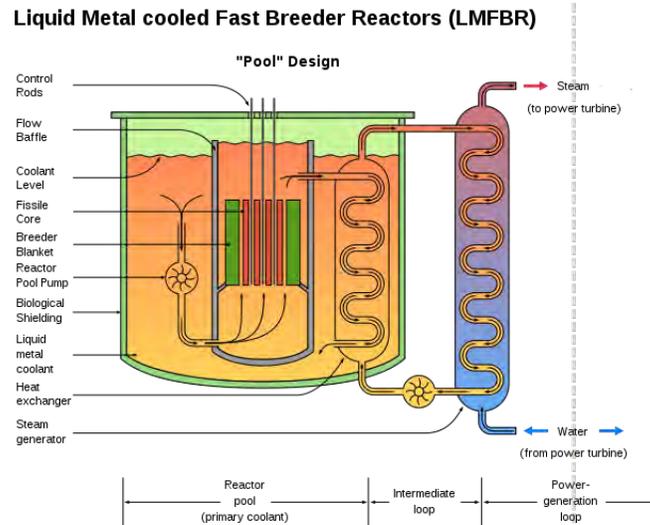


FIGURA 1.10. Esquema de un reactor de cría refrigerado por metal líquido (WNA, 2016[m]).

Características	Tipos de Reactores				
	PWR	BWR	PHWR	GCR	FR
Espectro neutrónico	Térmico <sup>11</sup>	Térmico	Térmico	Térmico	Rápido
Moderador	Agua ligera <sup>12</sup>	Agua ligera	Agua pesada	Grafito	No usa
Refrigerante	Agua ligera	Agua ligera	Agua pesada <sup>13</sup>	Gas <sup>14</sup>	Metal líquido <sup>15</sup> o gas <sup>14</sup>
Ciclo termodinámico	Rankine indirecto	Rankine directo	Rankine indirecto	Rankine indirecto o Brayton directo	Rankine indirecto o Brayton directo

TABLA 1.4. Tipos de reactores nucleares

<sup>10</sup>El coeficiente de reactividad por temperatura  $\alpha_T$  es un parámetro que describe la manera en la que cambia la reactividad  $\rho$  al variar la temperatura, de modo que  $\alpha_T = \frac{d\rho}{dT}$ .

**4.6. Reactores Avanzados.** La nueva generación de reactores denominada generación III/III+ presenta mejoras que contribuyen a una reducción en los costos y un aumento en seguridad y eficiencia de las plantas nucleares.

Estos nuevos reactores poseen diseños estandarizados para un licenciamiento expedito y menor costo y tiempo de construcción, además de ser más simples y robustos para simplificar su operación y evitar fallas operacionales, una mayor disponibilidad y tiempo de vida útil (comúnmente 60 años), probabilidad muy reducida de fusión del núcleo, un mayor tiempo de acción para el operador de modo que después de un accidente no se requiera una intervención activa por un periodo prolongado (típicamente 72 horas), resistencia a daños serios por el impacto de una aeronave, mayor quemado de combustible para su uso más completo, eficiente y reduciendo la cantidad de residuos, y mayor uso de absorbentes neutrónicos quemables para extender la vida del combustible (WNA, 2015a).

Entre sus principales novedades se encuentran la capacidad de seguimiento de carga y la construcción modular<sup>16</sup> que acelera el tiempo de construcción (WNA, 2015a). Los reactores de la generación III+ son aquellos en los que los sistemas de seguridad no requieren de intervención de un operador o control y se basan en principios físicos como la gravedad, convección natural o resistencia a altas temperaturas, lo que se denomina sistemas pasivos de seguridad.

En 1999, el Electric Power Research Institute publicó el documento “Advance Light Water Reactor Utility Requirements” como un primer paso del plan elaborado por el Nuclear Energy Institute en el que planteaba políticas sobre características clave como un tiempo de construcción de hasta 5 años, baja exposición de los trabajadores a radiación, recarga de combustible en un periodo de 24 meses y 87% de disponibilidad sobre un diseño de vida de 60 años (Murray y Holbert, 2015). Estos nuevos diseños hacen más adecuada a la energía nuclear para ser utilizada para sustituir el uso de combustibles fósiles debido a que tienen por lo tanto un menor riesgo de accidentes, un menor costo en la producción de electricidad y producen menos desechos.

**4.7. Reactores Pequeños Modulares.** A pesar de que los primeros reactores nucleares fueron pequeños y el desarrollo de la nucleoelectricidad produjo un rápido incremento en el tamaño, por diversas razones se ha generado un incremento de interés en los Reactores Modulares Pequeños/Reactores Pequeños y Medianos (SMRs, Small Modular Reactors/Small and Medium-sized Reactors) (Murray y Holbert, 2015). Se espera que estos sean construidos en una fábrica especializada, llevados al sitio de la planta e instalados en bloques de potencia de uno o más para flexibilidad, y que sean simples, seguros, de larga vida útil y resistentes a la proliferación (Murray y Holbert, 2015). Además podrían proveer de calor para desalinización o calefacción urbana (Murray y Holbert, 2015).

---

<sup>11</sup>Esto se refiere a que la energía de la mayoría de los neutrones es menor a 0.1 MeV, en contraste con los reactores rápidos donde la mayoría de los neutrones tienen una energía de entre 0.1 y 1 MeV, es decir, no son moderados.

<sup>12</sup>Agua ordinaria ( $H_2O$ )

<sup>13</sup>Agua con alto contenido de deuterio ( $D_2O$ )

<sup>14</sup>Dióxido de carbono o helio.

<sup>15</sup>Sodio, plomo o plomo-bismuto.

<sup>16</sup>Uso de componentes ensamblados en módulos estructurales que posteriormente se colocan en su sitio. No confundir con los reactores modulares.

La experiencia acumulada en reactores pequeños es muy amplia debido a que existen cientos usados para propulsión naval y como fuentes de neutrones, y actualmente existen diseños avanzados para producción de electricidad que se están construyendo por primera vez o se encuentran aún en planeación (WNA, 2016j). Aunque existe un beneficio para los reactores más grandes debido a la economía de escala, los reactores pequeños implican una menor inversión inicial y la capacidad de hacer pequeñas adiciones de capacidad, haciéndolos más adecuados para sitios remotos o economías emergentes (Murray y Holbert, 2015). La IAEA define a los reactores pequeños como aquellos con una potencia menor a 300 MW y a los medianos como los que generan hasta 700 MW. Estos también cuentan con estrictos estándares de seguridad y por su menor costo de inversión inicial son adecuados para regiones con un incremento lento de la demanda.

## 5. Seguridad Nuclear

El uso de la energía nuclear para la producción de electricidad ha resultado controversial debido a la preocupación existente respecto a la seguridad, especialmente en los efectos en la salud durante la operación normal de los reactores, en caso de accidentes y la proliferación de armamento nuclear. Para tomar una decisión de este tipo es necesario primero conocer los aspectos relacionados con esto y hacer un balance entre los verdaderos riesgos que representa, y los beneficios que se obtendrían. Es importante notar que, debido a sus características, es prácticamente imposible que se de una explosión nuclear en un reactor (Marder, 2011).

**5.1. Radiación y Salud.** Uno de los principales temores que surgen al hablar de la energía nuclear es la radiación y la manera en la que afectan a la salud humana, especialmente debido a la falta de conocimientos respecto al tema. Radiación es la emisión de energía en forma de ondas o partículas. Cuando esta se origina durante la transformación de un núcleo atómico se le denomina radiación nuclear. Esta puede ser inducida como en la fisión, o espontánea en el caso de algunos isótopos a los que se les denomina radiactivos debido a la capacidad de pasar por este proceso, denominado decaimiento radiactivo.

La radiación se puede presentar en forma de partículas  $\alpha$  (núcleos de helio), partículas  $\beta$  (electrones), positrones, protones, neutrones o fotones (denominándose radiación electromagnética, teniendo como ejemplos la luz visible, los rayos X y  $\gamma$ ) y se clasifican en radiación ionizante y no ionizante. La primera está compuesta por aquella que tiene carga eléctrica (e.g.  $\alpha$ ,  $\beta$ ) y/o suficiente energía (e.g.  $\gamma$ , rayos X) para interactuar fuertemente con la materia y causar ionización. La segunda no suele interactuar por lo que no representa un riesgo para los seres vivos (e.g. luz, ondas de radio).

Para medir la dosis de radiación recibida es posible utilizar como unidad el Grey, definido como una unidad de energía absorbida por unidad de masa (J/kg). Sin embargo, los efectos biológicos varían dependiendo del tipo de radiación por lo que se ha establecido otra magnitud denominada *dosis equivalente*, que resulta de la multiplicación de la dosis recibida por un factor, y tiene como unidad en el sistema internacional el Sievert (Sv). Ambas magnitudes se relacionan según la ecuación 3

$$(3) \quad H = Q \times D$$

donde  $H$  es la dosis equivalente,  $D$  la dosis recibida y  $Q$  un factor de calidad que depende del tipo de radiación y su energía. En la Tabla 1.5 se puede ver una lista de factores de calidad para diferentes tipos de radiación.

Tipo de radiación	$Q$
Rayos X y $\gamma$	1
Partículas $\beta$	1
Neutrones ( $E \leq 1\text{keV}$ )	2
Neutrones ( $E$ desconocida)	10
Protones de alta energía	10
Iones pesados (incluyendo partículas $\alpha$ )	20

TABLA 1.5. Factores de Calidad de diferentes tipos de radiación (Murray y Holbert, 2015)

Otro elemento a considerar es el tiempo de exposición, siendo diferente el efecto de recibir una dosis de radiación en un periodo corto de tiempo a uno más largo.

**5.2. Radiación Natural.** De manera natural, los seres vivos estamos expuestos continuamente a la radiación proveniente de diversas fuentes sin que represente un riesgo para la salud, ya que la probabilidad de que genere efectos nocivos depende de la dosis y el tiempo de exposición. Los rayos cósmicos son radiación proveniente del espacio, principalmente protones e incluyendo partículas muy energéticas. Toda la corteza terrestre tiene en mayor o menor medida uranio, por lo que continuamente recibimos radiación gama del decaimiento de este elemento, presente en el suelo y los materiales de construcción que utilizamos para los edificios. El decaimiento del uranio tiene radón como uno de sus subproductos, el cual tiene subproductos al decaer que se adhieren a partículas suspendidas en el aire por lo que puede ser inhalado e irradiar los pulmones. En espacios abiertos, este se dispersa rápidamente, pero en espacios cerrados puede acumularse si no cuentan con la ventilación adecuada. Otros radionúclidos están presentes también en el aire, alimentos y agua por lo que se convierten en fuentes internas de radiación, volviéndose también parte de los tejidos vivos.

Las dosis debido a fuentes artificiales son menores a las de las fuentes naturales. En medicina, las dosis de radiación se deben a métodos de diagnóstico como los rayos X y las tomografías computarizadas y tratamientos con medicina nuclear o radioterapia. Hay actividades no necesariamente relacionadas de manera directa con las actividades nucleares que provocan aumentos en las dosis de radiación recibidas por sus trabajadores, siendo denominada una fuente ocupacional, entre las que se encuentran el radón en las minas, la tripulación de los vuelos, oficinas en sitios con mayor presencia de radón, entre otros; aunque el impacto es muy pequeño. Otras actividades humanas también aumentan la dosis de radiación recibida anualmente por la población, entre las que se encuentran los residuos de las pruebas nucleares antes de su prohibición, los isótopos radiactivos que se encuentran en el carbón y son liberados a la atmósfera durante su quemado y algunos dispositivos domésticos como detectores de humo, aunque estos aumentos tampoco son relevantes.

En la Tabla 1.6 se presentan las dosis de radiación ionizante típicas recibidas por persona al año de las diversas fuentes mencionadas. Se puede observar que la dosis recibida por la gente debido a la generación de electricidad por medios nucleares representa solamente el 0.008 % de la radiación natural, mientras la contribución de la operación de una central nuclear a nivel local es de solamente 0.0001 mSv/año, menor que la del minado y molido de uranio con 0.025 mSv/año o 1 % de la recibida por fuentes naturales (UNSCEAR, 2008). La

## La Nucleoelectricidad

dosis total presentada aquí es de 2.4 mSv/año aunque el promedio nacional en algunos países es hasta de 10 mSv/año y los valores individuales en algunos sitios pueden llegar hasta 100 mSv/año (IAEA, 2004).

Fuente	Dosis (mSv)
<i>Natural</i>	
Radón (entorno)	1.26 <sup>17</sup>
Rayos gamma (entorno)	0.48
Rayos cósmicos (nivel del mar)	0.39
Cada 100 m de elevación	+ 0.02 <sup>a</sup>
Ingestión	0.29
<b>Total</b>	2.4 (más ajuste por altitud)
<i>Artificial</i>	
Pruebas de armas nucleares	0.0025
Procedimiento médicos	0.62
Centrales nucleoelectricas	0.0002
Centrales carboelectricas	0.0001
Aplicaciones domésticas	0.0004 <sup>a</sup>
<b>Total</b>	0.375

TABLA 1.6. Dosis de radiación ionizante recibida al año por diferentes fuentes (Hore-Lacy, 2006), (UNSCEAR, 2008)<sup>a</sup>.

Aunque es muy difícil controlar las dosis de radiación de fuentes naturales, existen organismos internacionales como la IAEA, el Comité Científico de las Naciones Unidas sobre los Efectos de la Radiación (UNSCEAR, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation) y la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP, International Commission on Radiological Protection) que estudian los efectos de la radiación en los seres vivos y establecen estándares para la reducción del riesgo de efectos adversos por la exposición a radiación. Entre los principios como el monitoreo y control constante de las dosis recibidas, el establecimiento de límites máximos de exposición, la intervención justificada y optimizada en caso de ser necesario reducir la exposición a radiación de la población debido a altos niveles de radón en el interior de un edificio o un accidente, y la justificación de la práctica de alguna actividad relacionada con la radiación para asegurar que los beneficios obtenidos sean mayores que los riesgos. Respecto a este último, es importante observar que también aplica para optar por el uso de la energía nuclear para producir electricidad, siendo necesario compararla con sus alternativas.

Los límites de exposición actualmente son de 20 mSv/año en promedio durante 5 años, sin exceder los 50 mSv/año durante ninguno de estos años, para los trabajadores de la industria nuclear y 1 mSv/año para el público general (IAEA, 2004). En la Tabla 1.6 se puede observar que la radiación recibida debido a las centrales nucleoelectricas es mucho menor por lo que no representa un peligro para la población. En el caso de los trabajadores de la industria nuclear, normalmente la radiación recibida es muy inferior a los límites recomendados (Hore-Lacy, 2006).

<sup>17</sup>El rango de la dosis debido al radón varia ampliamente según el sitio por lo que también la estimaciones de la dosis media anual varían según la fuente consultada, otro valor encontrado es de 1.2  $\frac{\text{mSv}}{\text{año}}$  (IAEA, 2004)

**5.3. Seguridad.** El objetivo del estudio de la seguridad nuclear es reducir el riesgo de accidentes y el impacto en caso de que sucedan, por medio de mecanismos inherentes, pasivos o de diseño ingenieril. Una meta fundamental para esto es evitar la liberación de radionúclidos al ambiente por lo que los sistemas de seguridad buscan mantener la integridad del núcleo, especialmente evitando el sobrecalentamiento, y contener el material radiactivo.

Para el diseño, construcción y supervisión de los componentes de los reactores se suelen usar técnicas y materiales modernos para asegurar su durabilidad y evitar defectos. También existen procedimientos definidos para su operación y límites en los parámetros. Los diseños de reactores requieren del licenciamiento para su construcción, además de que se realizan auditorias constantes a las centrales según los sistemas de cada país y de instituciones internacionales a través de acuerdos de cooperación. Para la operación de la central, los trabajadores requieren de entrenamiento especial y evaluaciones de manera continua, incluyendo simulacros de los planes de emergencia.

Los sistemas de emergencia principales actúan bajo la condición de pérdida de refrigerante (Loss of Coolant Accident, LOCA) debido a fugas para mantener la temperatura del núcleo bajo los límites de seguridad establecidos.

*5.3.1. Evaluación Probabilística de Riesgos (Probabilistic Risk Assessment, PRA).* Para determinar la seguridad en la industria nuclear, tanto de manera general como para asignar prioridades en los cambios de equipo, operación y como guía para los planes de emergencia, se utiliza un método formal denominado Evaluación Probabilística de Riesgos (PRA, Probabilistic Risk Assessment). La PRA utiliza teoría de conjuntos y probabilidades de fallo en elementos individuales para calcular el riesgo de un accidente, que implica la frecuencia con la que debe suceder este evento y sus consecuencias.

*5.3.2. Fenómenos Naturales y Terrorismo.* El diseño de los reactores nucleares sigue normas que contemplan diversas circunstancias que pueden desencadenar un accidente, considerando entre ellas los fenómenos naturales como vientos fuertes, tornados, inundaciones, incendios, huracanes, impacto de aviones y terremotos. Algunos de los parámetros considerados son la resistencia de las estructuras, la ubicación de los elementos en cuanto a la altura y en relación con otros, sistemas de vigilancia y perímetros de seguridad. Además cuentan con procedimientos de seguridad para estos eventos.

**5.4. Accidentes.** Los esfuerzos realizados para mejorar la seguridad y la experiencia acumulada en la industria nuclear han tenido como resultado que el número de accidentes sea reducido y con pocas consecuencias. Una forma de medir las implicaciones que tienen los accidentes en la salud pública es el número de fatalidades directas que han causado. En la Tabla 1.7 se puede ver una comparación entre diferentes fuentes de energía en países de la OCDE y aquellos que no pertenecen a esta organización (No-OCDE). Se puede ver que en ambos casos la energía nuclear tiene el menor número de fatalidades, siendo 0 en la primer categoría.

Aunque es difícil encontrar datos precisos, se estima que en el 2000 hubo 960,000 muertes prematuras en el mundo debido a la contaminación aérea causada por el uso de combustibles fósiles, de las cuales unas 288,000 (el 30 %) se pueden atribuir a fuentes de energía (NEA, 2010). Estas sobrepasan por mucho aquellas causadas por la radiación debido a accidentes. Un estudio del Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT, Massachusetts Institute of Technology) también señala unas 210,000 muertes prematuras en EU por contaminación

Fuente	OCDE		No-OCDE	
	Fatalidades	Fatalidades normalizadas ( $\frac{\text{muertes}}{\text{TW año}}$ )	Fatalidades	Fatalidades normalizadas ( $\frac{\text{muertes}}{\text{TW año}}$ )
Carbón	2,259	157	18,017	597
Petróleo	3,713	132	16,505	897
Gas natural	1,043	85	1,000	111
Hidráulica	14	3	29924	10,285
Nuclear	0	0	31	48

TABLA 1.7. Comparación de fatalidades inmediatas en accidentes severos (más de 5 fatalidades) entre 1962 y 2000 (NEA, 2010)

atmosférica debido al uso de combustibles fósiles, de las cuales unas 54,000 se deben a la generación de electricidad Chu (2013). Se proyecta que durante los 70 años posteriores al accidente de Chernobyl ocurran alrededor de 33,000 fatalidades considerando una hipótesis de linealidad entre dosis-riesgo (NEA, 2010). Esto sería el 0.16 % de las que se podría estimar que ocurran a causa de la contaminación por el uso de combustibles fósiles en la generación de electricidad de mantenerse anualmente la cifra del 2000. Además representan el 0.07 % de las fatalidades que se estima que sean causadas por la radiación natural de fondo, que son en total 50,000,000 (NEA, 2010), por lo que no sería posible corroborarlas.

En la industria nuclear la seguridad se mantiene en evaluación continua y los accidentes ocurridos han permitido aprender lecciones importantes que han dado pie a la modificación de los diseños, procedimientos, sistemas, filosofía y estándares utilizados.

Para evaluar la severidad de los accidentes se ha desarrollado la *Escala Internacional de Evento Nuclear* (International Nuclear Event Scale, INES) que va desde 0, insignificante, hasta 7, accidente mayor con un alto impacto en la salud y el ambiente. De los 3 accidentes más importantes en centrales nucleoelectricas, solamente 2 han llegado hasta el nivel 7 en la escala, los de Chernobyl y Fukushima, mientras el de Three Mile Island llegó al nivel 5 que implica daño severo al reactor con un impacto limitado en el entorno (WNA, 2016i). Siendo ejemplos importantes de las causas y efectos de un accidente nuclear, se describen a continuación.

*5.4.1. Three Mile Island.* El 28 de marzo de 1979 hubo una pequeña liberación de radionúclidos y la fusión del núcleo en la unidad dos de la central nucleoelectrica Three Mile Island, en Pensilvania. Esto se debió a insuficiencia de instrumentación y mal monitoreo de agua, falla en una válvula y errores de operación. Las dosis recibidas por las personas en el sitio fueron menores a 0.1 mSv y para la población, en un radio de 80 km, fue de aproximadamente 0.011 mSv. Se estima que como consecuencia del accidente podría aumentar en 1 el número de muertes de cáncer, de entre 325,000 causadas por otros factores, entre los habitantes de la región, que son alrededor de 2 millones (Murray y Holbert, 2015).

*5.4.2. Chernobyl.* En 1986, el 26 de abril, sucedió un accidente en la unidad 4 de Chernobyl, en la Unión Soviética. La causa principal fue la violación de las reglas de seguridad durante unas pruebas, aunado a deficiencias en el diseño del reactor al encontrarse en un

edificio industrial normal en lugar de un edificio de contención especial y coeficiente de huecos de reactividad positivo<sup>18</sup>. El núcleo del reactor se fundió y hubo reacciones químicas que generaron una explosión que abrió un agujero en el techo del edificio y permitieron que escaparan radionúclidos. De alrededor de 200 personas que fueron hospitalizadas debido al accidente, 31 fallecieron. Las 135,000 personas que fueron evacuadas en un radio de 30 km, recibieron dosis menores a 25 mSv cada una (Murray y Holbert, 2015). La contaminación afectó cultivos en otros países que tuvieron que ser desechados. Debido a que el diseño del reactor, RBMK-1000, era inherentemente inseguro, fue descartado en vista de lo sucedido. Debido al impacto además se reforzó la cooperación internacional entre Estados Unidos y la Unión Soviética de manera directa, y junto con otros países a través de la creación de la Asociación Mundial de Operadores de Reactores (World Association of Nuclear Operators, WANO). En la actualidad, el reactor 4 de Chernobyl se encuentra confinado en una estructura construida en octubre de 1986 con el fin de permitir el funcionamiento de los demás reactores, de los cuales el último dejó de operar en el año 2000, y está por completarse la construcción de una estructura de confinamiento segura nueva y mejor (WNA, 2016a). Además, los niveles de radiación han disminuido considerablemente y todo ha vuelto a la normalidad en gran parte del área afectada, aunque se mantiene la zona de exclusión de 30 km a la redonda a la cual hay acceso restringido (IAEA, 2016a).

*5.4.3. Fukushima.* En el 2011, el 11 de marzo, ocurrió un accidente que involucró varias unidades de la central Fukushima Daiichi en Japón, como consecuencia de un tsunami causado por un terremoto de magnitud 9. Debido al terremoto dejó de haber suministro de electricidad y el tsunami dejó inoperantes los generadores de emergencia. Aunque el reactor ya se había apagado, era necesaria la remoción del calor de decaimiento de los subproductos de la fisión, por lo que hubo pérdida de refrigerante que causó la fusión del núcleo, generación de hidrógeno y liberación de radionúclidos a la contención primaria y posteriormente a la secundaria en el momento en el que los operadores intentaron despresurizar la primera estructura en lugar de permitir su ruptura. El hidrógeno generó explosiones en 3 unidades permitiendo la liberación de radionúclidos. La Comisión de Investigación Independiente del Accidente Nuclear de Fukushima (Fukushima Nuclear Accident Independent Investigation Commission, NAIIC) consideró que errores humanos causaron el accidente y aunque hubo una evacuación en un radio de 20 km, no causó pérdidas humanas inmediatas (Murray y Holbert, 2015). En un estudio reciente en el que se comparan datos de mediciones directas con los calculados con base en inspecciones aéreas, Miyasaki y Hayano (2016) encontraron que las dosis recibidas por la gente son de 3 a 5 veces más pequeñas que las estimadas originalmente.

**5.5. Proliferación de Armamento Nuclear.** Una de las preocupaciones comunes al hablar de energía nuclear es la proliferación de armas nucleares, sin embargo es importante considerar que la solución a este problema es política en lugar de técnica, y evitar el uso de la energía nuclear para fines pacíficos no implica una reducción significativa a esta amenaza debido a las diferencias que existen entre estas tecnologías, por lo que los países que busquen desarrollar armamento nuclear pueden no tener, o contar con pocas, centrales nucleoelectricas, o tener varias y no hacerlo. Una prueba de esto y el éxito de las medidas

---

<sup>18</sup>Una medida del efecto que tiene la presencia de huecos en el moderador o refrigerante, en el caso de los reactores que usan agua sería la presencia de burbujas. Un valor positivo indica que la presencia de estos incrementa las reacciones, y uno negativo las disminuye.

internacionales tomadas es que aunque 30 países tienen centrales nucleares (IAEA, 2017), solamente 8 poseen armamento nuclear a pesar de que se esperaba que para fin del siglo pasado fueran entre 30 y 35 (Hore-Lacy, 2006).

El uso de los reactores comerciales para la obtención de material para armamento es poco eficiente debido a su ciclo de combustible. El material requerido para producir armamento nuclear debe tener un enriquecimiento mayor al 90 % de  $^{235}_{92}\text{U}$  o  $^{239}_{94}\text{Pu}$  (Hore-Lacy, 2006) por lo que se requiere de otros procesos para su obtención.

Para evitar la proliferación de armas nucleares existen medidas internacionales como el tratado de no proliferación y creación de comisiones nacionales e internacionales de salvaguardas que hacen auditorías como parte de los acuerdos de cooperación y compra-venta.

## 6. Otras Aplicaciones de la Energía Nuclear

La producción de electricidad es la principal función de los reactores que operan hoy en día; aunque algunos son usados para desalinización, calor para procesos y calefacción. Otro posible uso no eléctrico es la producción de hidrógeno (IAEA, 2014b).

## 7. Energía Nuclear y Sustentabilidad

Algo que se debe tomar en cuenta al hablar sobre fuentes de energía es cuales y en que grado son compatibles con el desarrollo sustentable, el cual se puede definir como aquel “que satisface las necesidades presentes sin comprometer la habilidad de las generaciones futuras de satisfacer las suyas” (World Commission on Environment and Development, 1987). El desarrollo sustentable está compuesto por tres aspectos fundamentales: el social, el económico y el ambiental. Algunos elementos del impacto de la energía nuclear en estos aspectos se presentan a continuación.

**7.1. Social.** El nivel de vida de la sociedad está vinculado con el consumo de energía directamente mediante su uso doméstico y de manera indirecta a través de la producción económica por lo que una sociedad sustentable debe tener una seguridad energética. La energía nuclear además es una fuente de empleos altamente capacitados que representan mejores ingresos. Sin embargo, existen algunos retos para la energía nuclear, la opinión pública sobre su uso y la corrupción.

*7.1.1. Seguridad Energética.* La seguridad energética es definida por la IEA (2015b) como “la disponibilidad ininterrumpida de fuentes de energía a un precio asequible” y engloba diferentes aspectos a corto plazo para ajustarse de manera adecuada a las necesidades del momento y a largo plazo para adecuarse al desarrollo sustentable. Wang y col. (2009) indican que “Un sector energético sustentable tiene un balance de producción de energía y consumo y no tiene, o es mínimo, impacto ambiental negativo (dentro de los límites de tolerancia ambiental), pero ofrece la oportunidad al país de llevar a cabo sus actividades sociales y económicas”.

*7.1.2. Diversificación.* Una de las características necesarias para la seguridad energética es la diversificación de las fuentes de energía para evitar la dependencia. Leal Cobos (2009) y González Bello (2012) utilizan el índice Shannon de diversidad como un indicador. Este se calcula según la ecuación 4 (Begon, Townsend, y Harper, 2006)

$$(4) \quad H = - \sum_{i=1}^S P_i \ln P_i$$

donde  $S$  es el número de especies y  $P_i$  la proporción de la especie  $i$ . Mientras mayor sea el valor, mayor es la riqueza e igualdad en la distribución (equidad). Al dividirlo entre el máximo valor que podría asumir (considerando cada unidad de un tipo diferente) según la ecuación 5 (Begon, Townsend, y Harper, 2006), se obtiene la Equidad  $E$ . Esta puede asumir valores entre 0 y 1, correspondiendo mayor equidad a mayor valor.

$$(5) \quad E = \frac{H}{H_{Max}} = \frac{- \sum_{i=1}^S P_i \ln P_i}{\ln S}$$

*7.1.3. Reservas.* Un ejemplo de lo relacionados que están los aspectos sociales, económicos y ambientales en el desarrollo sustentable es en el tema de las reservas de las fuentes de energía. El agotamiento de un recurso natural usado como fuente de energía no es sólo un asunto ambiental sino económicamente tiene un impacto debido a que esto eleva el costo de la energía generada por ese medio y limita el uso de la energía frenando el desarrollo social.

A pesar de que las energías renovables son fuentes intermitentes, pueden ser usadas de manera indefinida ya que son recursos que no se agotan. En el caso del uranio, se estima que las reservas duren al menos 90 años con costos menores a 3 veces el actual y hasta miles de años con mayores costos y desarrollo tecnológico adecuado (WNA, 2016k). Para los hidrocarburos, las reservas conocidas son suficientes para satisfacer la demanda por alrededor de 50 años más en el caso del gas natural y petróleo, y unos 150 años para el carbón, si se mantiene el ritmo de consumo actual (WEC, 2017).

*7.1.4. Factor de Capacidad.* Debido a la intermitencia de las energías renovables, especialmente eólica y solar, es difícil usar estas para satisfacer la carga base por lo que se requiere de otras fuentes. En la península de Yucatán se utilizan principalmente hidrocarburos. Una forma de cuantificar la intermitencia de una tecnología de generación de electricidad es por medio del factor de capacidad, que es la relación entre la energía producida durante un intervalo de tiempo y la que habría sido producida si hubiese funcionado a potencia máxima durante ese mismo periodo. Según la CFE (2012), el factor de capacidad de una central nuclear (ABWR) es de 0.9, para ciclo combinado es de 0.8 mientras el de la energía solar fotovoltaica es de 0.25 y para la eólica de hasta 0.4. Esto es consistente con los valores obtenidos durante el 2016 en Estados Unidos, con 0.92, 0.56<sup>19</sup>, 0.27 y 0.35 respectivamente (EIA, 2017b).

Un factor de capacidad alto en una central eléctrica indica que puede operar de manera más continua y con mayor potencia (respecto a la potencia nominal), mientras uno bajo implica mayor intermitencia y/o con potencia más baja, por lo que se requiere instalar una mayor capacidad para una demanda determinada. En la Figura 1.11 se puede ver una la capacidad instalada y la generación neta de energía eléctrica de las diferentes fuentes de energía en el mundo. Se observa que la participación en la generación de la energía nuclear (13.1%) es casi el doble de su participación en capacidad instalada (7.1%). También el

<sup>19</sup>Probablemente la diferencia es mayor debido a las políticas de combate al cambio climático que le dan prioridad a tecnologías más limpias.

## La Nucleoelectricidad

carbón y y la energía geotérmica presentan una mayor participación en la generación de electricidad respecto a su participación en capacidad instalada. La energía eólica tiene una participación en generación de más o menos la mitad de su participación en capacidad y para la energía fotovoltaica es de una tercera parte.

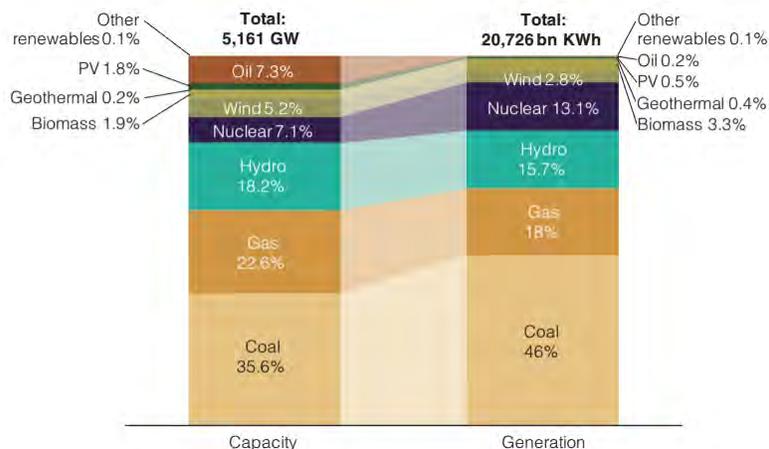


FIGURA 1.11. Capacidad instalada y generación neta de energía eléctrica por fuente a nivel mundial en 2011 (WEC, 2013).

En un análisis de más de 100 estudios que plantean que es factible un sistema eléctrico con 100 % de energías renovables, realizado por Heard y col. (2017), ninguno resultó ser suficientemente confiable. Dicho estudio utiliza criterios relacionados con la estimación de la evolución de la demanda, la producción de electricidad, la transmisión y los sistemas auxiliares. Concluye que no se debe excluir a priori ninguna tecnología que pueda ayudar a combatir el cambio climático ante la falta de evidencia empírica e histórica que apoye los escenarios de sistemas 100 % renovables. También indica que intentar conseguir estos escenarios sin un análisis crítico solamente retrasa la implementación de formas efectivas de combatir el cambio climático.

**7.1.5. Empleos.** Una central nuclear le ofrece empleo a entre 400 y 700 personas, además de hasta alrededor 3,500 trabajadores durante su construcción, muchos de los cuales son empleos cualificados y con salarios un 36 % más altos en promedio comparados con los empleos locales NEI (2017).

**7.1.6. Opinión Pública.** Debido a que la planeación energética tiene implicaciones políticas, además de los aspectos técnicos y los hechos relacionados con las fuentes de energía, la opinión pública se vuelve un factor importante. En 2012, el 45 % de la gente tenía una opinión favorable acerca del uso de la energía nuclear (Palacios Hernández, 2016).

## 7.2. Económico.

**7.2.1. Costo Nivelado de Generación.** El costo nivelado de generación de una central eléctrica integra los costos de las diferentes etapas del ciclo de vida, incluyendo la inversión, el combustible, operación y mantenimiento. Palacios y col. (2004) hacen una comparación de los costos nivelados de generación de diferentes diseños de centrales eléctricas nucleares

y de hidrocarburos, obteniendo como resultado, con una Tasa de Descuento<sup>20</sup> de 5 %, 26.56 US\$/MWh para la energía nuclear, 32.8 US\$/MWh para el carbón y 35.34 US\$/MWh para el gas natural. Estos resultados son comparados con estudios de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OECD, Organization for Economic Co-operation and Development) (1998) y del gobierno de Finlandia (2002) siendo consistentes los 3. En la Tabla 1.8 se presentan los resultados para una tasa de descuento de 8 %.

Fuente	Costo instantáneo de inversión (US\$/kWe)	Costo nivelado de generación (US\$/MWh)
Carbón	1,000	37.78
Gas <sup>21</sup>	500	38.60
Nuclear <sup>22</sup>	1,235	27.88

TABLA 1.8. Costos instantáneo de inversión y nivelado de generación de diferentes fuentes de energía (Palacios y col., 2004)

Sin embargo la CFE (2012) presenta datos diferentes en el COPAR 2012, con resultados de alrededor de 60 US\$/MWh para el gas natural (ciclo combinado), 70 US\$/MWh para el carbón y 90 US\$/MWh para las centrales nucleares. La variación en los valores absolutos probablemente se debe a aspectos económicos y específicos de la administración. Uno de los aspectos a destacar es la disminución del costo del gas natural en el periodo comprendido entre las fechas de publicación de los documentos (especialmente en Estados Unidos) (WEC, 2017), factor al que resulta muy sensible el costo nivelado de generación de las centrales que utilizan este combustible. Esto puede explicar la disminución en el costo nivelado de generación de las centrales de gas con respecto a las nucleares.

Estos datos también son consistentes con el reporte *Projected Costs of Generating Electricity* (IEA y NEA, 2015), cuyos resultados para las tecnologías de carga base (ciclo combinado, carbón y nuclear) se pueden ver en la Figura 1.12. En este documento se analizan los costos nivelados de generación de diferentes tecnologías en los países de la OECD, considerando diferentes tasas de descuento.

La variabilidad en los costos de los hidrocarburos, por ejemplo en el caso del gas natural, es un aspecto al que es sensible el costo de generación, lo cual representa una desventaja con respecto al uranio cuyo costo es más estable (Ramírez Galicia, 2009). Un aumento del 100 % en el costo del gas natural, carbón y uranio implicaría un incremento en el costo nivelado de generación de 79.1 %, 55.44 % y 16.21 % respectivamente (Palacios y col., 2004). Las proyecciones realizadas por la EIA (2017a) pronostican un aumento en el costo del gas natural, llegando al doble del precio actual en el escenario de referencia, por lo que tomando el costo nivelado de generación reportado por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y

<sup>20</sup>La Tasa de Descuento  $d$  es una medida financiera para calcular el valor presente  $V_p$  del valor de un pago futuro  $V_f$  de modo que  $V_p = (1 - d)V_f$ .

<sup>21</sup>El costo nivelado es el promedio de dos escenarios presentados.

<sup>22</sup>Valor promedio de los diseños Reactor Avanzado de Agua en Ebullición (ABWR, Advanced Boiling Water Reactor), Reactor de Agua a Presión Pasivo Avanzado 600 (AP 600, Advanced Passive Pressurized Water Reactor 600), Reactor de Potencia Evolucionario (EPR, Evolutionary Power Reactor) y Reactor CANada Deuterio Uranio Avanzado (ACR, Advanced CANada Deuterium Uranium Reactor).

## La Nucleoelectricidad

el incremento porcentual debido al aumento del precio del combustible, el costo nivelado en 2030 sería de unos 107 US\$/MWh.

En el costo nivelado de generación no se suelen tomar en cuenta los costos externos, que son aquellos que no se producen de manera directa en la generación de electricidad sino por los efectos de esta actividad, como los provocados por el desmantelamiento<sup>23</sup> o la contaminación. Gómez y col. (2007) hacen un cálculo de los costos nivelados de generación sin externalidades e incluyendo las externalidades. La Tabla 1.9 muestra un resumen de sus resultados.

Fuentes	Costo Nivelado (US\$/MWh)		Incremento (%)
	Sin Externalidades	Con Externalidades	
Carbón	49.69	75.57	52.1
Gas	50.77	55.38	9.08
Nuclear <sup>24</sup>	33.31	35.91	7.81

TABLA 1.9. Costo nivelado de generación considerando externalidades (Gómez y col., 2007)

Los costos nivelados de generación de la energía solar fotovoltaica, eólica e hidroeléctrica reportados por la CFE (2012) son de unos 190 US\$/MWh, 80 US\$/MWh y 120 US\$/MWh respectivamente. Para la energía solar fotovoltaica y eólica, el costo nivelado de generación tiene una tendencia a la baja y se ha vuelto competitivo con otras tecnologías (IRENA, 2017).

<sup>23</sup>Este es incluido en los costos de las centrales nucleares pero no en otras

<sup>24</sup>Valores promedio de los resultados para los diseños ABWR, ACR, Reactor de Agua a Presión Pasivo Avanzado (AP 1000, Advanced Passive Pressurized Water Reactor) y EPR

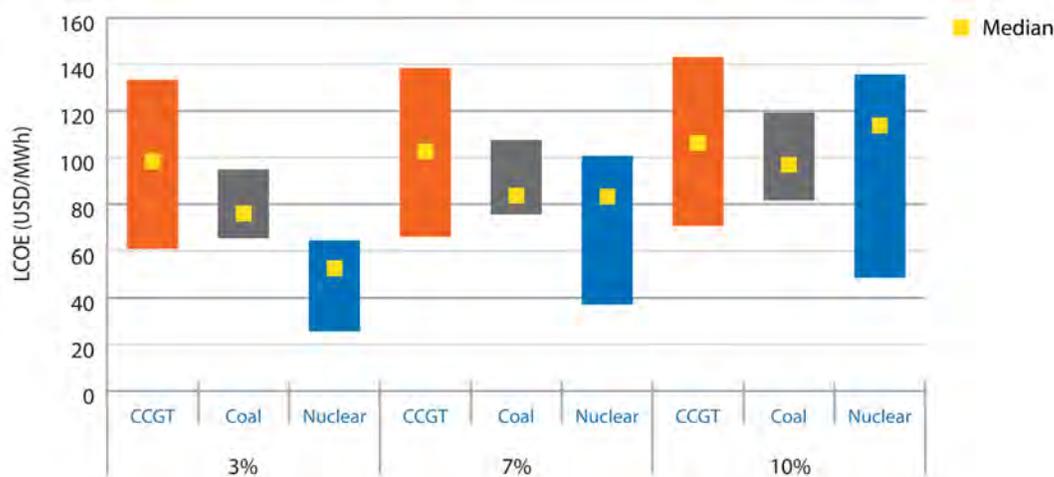


FIGURA 1.12. Rangos del Costo Nivelado de Generación para tecnologías de carga base con diferentes tasas de descuento (IEA y NEA, 2015).

7.2.2. *Costo de Inversión.* El componente con más peso en el costo nivelado de generación para la energía nuclear es el costo de inversión debido a sus altos valores y el bajo costo de operación y mantenimiento. Palacios y col. (2004) presenta un costo instantáneo (*overnight*<sup>25</sup>) de inversión de 1300 US\$/kWe un reactor ABWR, 1000 US\$/kWe para centrales de carbón y 500 US\$/kWe para centrales de gas. El costo de inversión de estas tecnologías contribuye con 17.03 US\$/MWh, 16.09 US\$/MWh y 7.689 US\$/MWh respectivamente al costo total, considerando una tasa de descuento del 8 %. La Tabla 1.8 muestra un resumen de los datos de este estudio. Priego Cuevas (2010) hace un análisis de sensibilidad a la tasa de descuento según las diferentes tecnologías y se puede observar que para el caso de la energía nuclear es considerable aunque no resulta ser la tecnología más sensible a este factor.

Esto puede representar un inconveniente ya que aunque a largo plazo una central resulta competitiva económicamente, requiere de fuertes inversiones. El uso de reactores pequeños modulares se considera una posible solución. Otra es la aplicación de diferentes mecanismos de financiamiento por medio de arreglos de prestamos e inversiones (WNN, 2017[b]).

7.2.3. *Desarrollo Económico.* La producción de bienes y servicios requiere del empleo de energía, por lo que el crecimiento económico de un país requiere de un aumento en la energía que consume, aunque la relación entre estos factores todavía no se ha podido determinar en la literatura (Menegaki, 2014; Saidi, Rahman, y Amamri, 2017). Saidi, Rahman, y Amamri (2017) recomiendan para los países de América que se consideren políticas al mismo tiempo de crecimiento económico y uso de energía para un desarrollo económico sustentable a largo plazo. En la Figura 1.13 se puede observar que efectivamente existe una correlación entre el consumo de energía en un país y el producto interno bruto per cápita. Esto además de servir como indicador de la eficiencia en el uso de la energía, muestra la tendencia de los países con mayor producción a consumir más energía por unidad de producto interno bruto. Por lo tanto, incluso considerando un aumento de eficiencia en el uso de energía, se puede esperar un incremento en el consumo total debido al crecimiento de la población que será mayor si hay desarrollo económico, lo cual sería favorable para el bienestar del país.

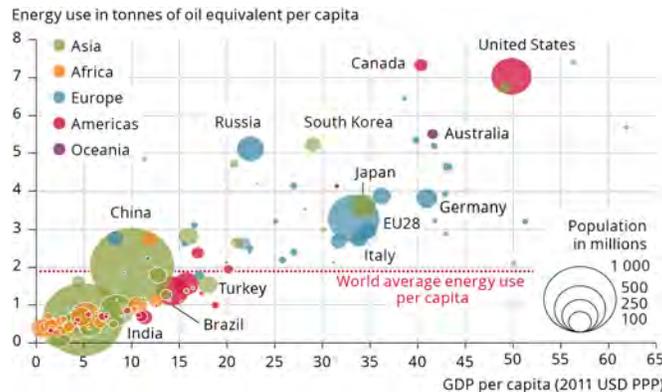


FIGURA 1.13. Correlación entre consumo de energía y Producto Interno Bruto por persona de varios países en 2011 (EEA, 2014).

<sup>25</sup>Costo de inversión que resultaría si el proyecto se completara en ese momento, sin que se tengan que pagar intereses

**7.3. Ambiental.** Todas las tecnologías de generación de electricidad tienen un impacto ambiental debido a los procesos productivos, uso de suelo, recursos consumidos y accidentes, entre otros. Uno de los aspectos que más atención requieren en la actualidad es incremento de gases de efecto invernadero, que “atrapan” la radiación infrarroja elevando la temperatura media del planeta, de los cuales el más significativo es el dióxido de carbono.

La concentración de estos gases no presentaba grandes variaciones en escalas cortas de tiempo antes de la revolución industrial, pero debido a la deforestación y la quema de combustibles fósiles, ha habido un incremento del 40 % en la concentración de CO<sub>2</sub> (de 280 ppm a 390 ppm) desde 1750 <sup>26</sup> (IPCC, 2015). Este incremento en la concentración de gases de efecto invernadero ha tenido varios efectos según el IPCC (2015), como:

- Aumento de la temperatura media de la superficie de la tierra de 0.85 C desde 1880 hasta 2012.
- Deshielo en regiones polares.
- Modificaciones en el ciclo del agua.
- Acidificación en los océanos de 0.1 de PH
- Aumento en el nivel medio del mar de 0.19 m de 1901 a 2010
- Modificaciones en el comportamiento de algunas especies (como en patrones de migración)
- Cambios en la frecuencia e intensidad de eventos meteorológicos.

De continuar con el aumento en la temperatura media global, estos efectos se intensificarían causando cambios irreversibles con un impacto negativo para la gente y los ecosistemas.

*7.3.1. Emisiones de CO<sub>2</sub>.* Anualmente, la quema de combustibles fósiles libera 25 mil millones de toneladas de CO<sub>2</sub> al ambiente, pero por cada 22 toneladas de uranio usadas en un reactor de agua ligera, se evita la emisión de 1 millón de toneladas de dióxido de carbono (Hore-Lacy, 2006). Aunque es importante notar que, como la energía solar o eólica, durante la operación de una central nuclear no se emite dióxido de carbono, un análisis más profundo debe tomar en cuenta las emisiones niveladas que resultan del ciclo de vida de estas fuentes. En un análisis de este tipo se incluyen las emisiones generadas por la obtención de materia prima, fabricación, construcción y clausura<sup>27</sup> de la central. En la Tabla 1.10 se encuentra la media de las estimaciones de emisiones de dióxido de carbono durante el ciclo de vida por tecnología, obtenidas a través de un meta-análisis. En este además se encuentra consistencia entre estudios realizados por universidades, agencias (incluyendo gubernamentales) y la industria (incluyendo asociaciones). Aún en las estimaciones más altas, la energía nuclear se encuentra en el mismo rango que las energías renovables con 130 kgCO<sub>2</sub>/MWh, comparable con la eólica con 124 kgCO<sub>2</sub>/MWh y significativamente por debajo del gas natural con estimaciones entre 362 y 891 kgCO<sub>2</sub>/MWh. El resultado obtenido en otro meta-análisis para la energía nuclear es consistente con esta información, siendo de 66 kgCO<sub>2</sub>/MWh en promedio, con solamente 3 estudios de 19 con estimaciones promedio de más de 40 kgCO<sub>2</sub>/MWh, todavía muy por debajo de los combustibles fósiles (Sovacool, 2008). Sovacool (2008) además señala entre los factores que incrementan las emisiones debido al sitio en el que se ubica la central nuclear es la necesidad de transportar el combustible.

<sup>26</sup>Este incremento parece tener un comportamiento exponencial y la mayor parte se dio en el último siglo

<sup>27</sup>Los factores que se incluyen en el ciclo de vida varían entre diferentes estudios

Tecnología	Emisiones (kgCO <sub>2</sub> /MWh)
Lignito	1,054
Carbón	888
Petóleo	733
Gas natural	499
Solar Fotovoltaica <sup>28</sup>	85
Biomasa	45
Nuclear	29
Hidroeléctrica	26
Eólica	26

TABLA 1.10. Estimaciones promedio de las emisiones de CO<sub>2</sub> de diversas tecnologías de generación de electricidad durante su ciclo de vida (WNA, 2011)

Las centrales nucleares tampoco emiten SO<sub>2</sub>, causante de la lluvia ácida, ni NO<sub>x</sub> que producen smog y dañan la capa de ozono.

Durante el proceso de minado de uranio hay un fuerte control del impacto ambiental por lo que no se presenta contaminación de manera significativa.

7.3.2. *Uso de Suelo.* Uno de los impactos que tienen las actividades humanas, incluyendo al generación de energía, es el uso de suelo. La intensidad de uso de suelo se puede definir como el área requerida para generar una unidad de energía en un año, por lo que se puede usar como unidad km<sup>2</sup>/TWh/año. La Tabla 1.11 muestra una estimación del uso de suelo para 2030 de varias fuentes de energía.

Tecnología	Uso de Suelo (km <sup>2</sup> /TWH/año)
Nuclear	2.4
Geotérmica	7.5
Carbón	9.7
Gas Natural	18.6
Fotovoltaica	16.9
Hidroeléctrica	54.0
Eólica	72.1
Biomasa	543.4
Biodiesel de Soya	894

TABLA 1.11. Intensidad de uso de suelo por fuente de energía, estimada para 2030 (McDonald y col., 2009).

<sup>28</sup>En el estudio se explica que los reportes más antiguos hacen estimaciones más altas y se puede atribuir al desarrollo de esta tecnología la reducción en las emisiones.

*7.3.3. Contaminantes Radiactivos.* Una de las principales preocupaciones de la gente respecto a las centrales nucleoelectricas es la presencia de contaminantes radiactivos en los alrededores. Sin embargo, los estudios al respecto muestran que las centrales de carbón producen más contaminantes de este tipo que las centrales nucleares debido a que, aunque la concentración de elementos radiactivos es baja en este combustible, una parte de estos se libera al ambiente junto a las cenizas producidas durante la combustión (PNRA, 2015). La PNRA (2015) hace una revisión de los resultados de algunos estudios y expone que por ejemplo, el resultado de uno de la NCRP es que la exposición de la población por la operación de centrales comparables de 1000 MWe de carbón y nuclear es de 1.9 hombre-Sv/año<sup>29</sup> y 0.048 hombre-Sv/año respectivamente, es decir aproximadamente 40 veces más. Okamoto (1984) hace un análisis de las centrales de gas natural, concluyendo que generalmente la contaminación radiactiva causada por estas es menor que para las centrales de carbón. Sin embargo, también encuentra que el mal manejo del gas natural y el uso de gas natural con alta radiactividad (como se ha registrado en Estados Unidos y Canadá) puede aumentar de manera significativa la contaminación radiactiva de estas centrales.

## **8. Energía Nuclear como Opción en la Matriz Energética**

En este capítulo se presentó de manera general el proceso de generación de electricidad por medios nucleares, ofreciendo datos sobre algunas características importantes entre los que se encuentran los costos, el impacto ambiental y su contribución a la seguridad energética. Además se compararon algunas de estas características con las de otras tecnologías de generación de electricidad. Dadas las ventajas que presenta la generación de energía eléctrica por medios nucleares, se ve la necesidad de continuar contemplando su uso dentro de la matriz energética del país, así como promover su desarrollo ante la urgencia de reducir las emisiones de Gase de Efecto Invernadero (GEI).

---

<sup>29</sup>hombre-Sv es una unidad de medida de dosis efectiva colectiva, que es la suma de las dosis recibidas por un grupo de gente

## Condiciones en México y la Península de Yucatán

En el Capítulo 1 se presentaron algunas características del uso de la energía nuclear para la generación de electricidad y se hizo una comparación con otras tecnologías, determinando la necesidad de contemplar centrales nucleoelectricas para reducir las emisiones de GEI y hacer más sustentable el desarrollo de la sociedad. En este capítulo analizaremos las condiciones de la energía eléctrica en México, con especial interés en la energía nuclear y los estados que conforman la península de Yucatán, considerando los aspectos legales, la planeación existente, necesidades energéticas, ambientales y aspectos sociales.

### 1. Marco Legal

En la legislación mexicana se contempla la planeación del suministro de electricidad y el uso de la energía nuclear para este fin. La Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, en su artículo 25 señala que el estado tiene un papel rector en el desarrollo nacional teniendo a su cargo de manera exclusiva la planeación y control del Sistema Eléctrico Nacional (SEN) y el servicio público de transmisión y distribución eléctrica, siendo este una de las áreas estratégicas. Se establece en el artículo 27 que el aprovechamiento de los combustibles nucleares para la generación de energía nuclear y otros propósitos corresponde exclusivamente a la Nación y solamente tendrá fines pacíficos. El artículo 28 indica que no se considera monopolio la exclusividad de la Nación en el aprovechamiento de minerales radiactivos y generación de energía nuclear, la planeación y control del SEN, y el servicio público de transmisión y distribución de energía eléctrica, definiéndolos como áreas estratégicas; y determina que la Comisión Nacional de Hidrocarburos y la Comisión Reguladora de Energía (CRE) son los órganos encargados de la regulación energética (H. Congreso de la Unión de los Estados Unidos Mexicanos, 1917).

La Ley Orgánica de la Administración Pública Federal (H. Congreso de la Unión de los Estados Unidos Mexicanos, 1976) indica, en su artículo 33, que corresponde a la Secretaría de Energía (SENER) establecer, conducir y coordinar la política energética del país, así como supervisar su cumplimiento con prioridad en la seguridad y diversificación energéticas, el ahorro de energía y la protección al medio ambiente, teniendo la facultad de coordinar, realizar y promover programas, proyectos, estudios e investigaciones sobre las materias de su competencia. Le atribuye la dirección y supervisión de la generación de energía nuclear y los minerales radiactivos. También le concierne llevar a cabo la planeación energética a mediano y largo plazos con base en criterios definidos, así como fijar las directrices económicas y sociales para el sector energético nacional, conforme a disposiciones aplicables, además de elaborar anualmente un informe pormenorizado que permita conocer el desempeño y las tendencias del sector eléctrico nacional (H. Congreso de la Unión de los Estados Unidos Mexicanos, 1976). Sobre la planeación energética establece que

...deberá atender los siguientes criterios: la soberanía y la seguridad energéticas, el mejoramiento de la productividad energética, la restitución de reservas de hidrocarburos, la diversificación de las fuentes de combustibles, la reducción progresiva de impactos ambientales de la producción y consumo de energía, la mayor participación de las energías renovables en el balance energético nacional, la satisfacción de las necesidades energéticas básicas de la población, el ahorro de energía y la mayor eficiencia de su producción y uso, el fortalecimiento de las empresas productivas del Estado del sector energético, y el apoyo a la investigación y el desarrollo tecnológico nacionales en materia energética;

La Ley de la Industria Eléctrica (H. Congreso de la Unión de los Estados Unidos Mexicanos, 2014), que entró en vigor en el año 2014 sustituyendo la Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica, establece como finalidad en el artículo 1º “promover el desarrollo sustentable de la industria eléctrica y garantizar su operación continua, eficiente y segura en beneficio de los usuarios...”. El artículo 2º indica que la planeación y el control del SEN son áreas estratégicas y el suministro básico es una actividad prioritaria para el desarrollo nacional. Esta también define a la energía nuclear como energía limpia (H. Congreso de la Unión de los Estados Unidos Mexicanos, 2014).

La construcción y operación de centrales nucleoléctricas corresponden exclusivamente a la CFE, cuya organización es regulada por la Ley de la Comisión Federal de Electricidad publicada el 11 de agosto del 2014 ; según lo estipulado por la Ley Reglamentaria del Artículo 27 Constitucional en Materia Nuclear, que regula el uso de materiales radiactivos para sus diferentes fines (H. Congreso de la Unión de los Estados Unidos Mexicanos, 1985). Esta establece lineamientos de seguridad para las actividades nucleares, junto con la constitución de la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias (CNSNS) para regular y supervisar la seguridad en las actividades nucleares en el país, y el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ) para la investigación, desarrollo y vinculación de las ciencias y tecnología nucleares.

El tercer artículo transitorio de la Ley de Transición Energética (H. Congreso de la Unión de los Estados Unidos Mexicanos, 2015) plantea la meta de un 35 % de participación de energías limpias para el año 2024. Según el artículo transitorio décimo sexto, para que una fuente de energía sea considerada limpia en los términos establecidos por la legislación y planeación mexicana, es necesario que sus emisiones de dióxido de carbono sean menores a 100 kg por MWh (H. Congreso de la Unión de los Estados Unidos Mexicanos, 2015).

Fundamentado en los documentos anteriores, la evolución del SEN se desarrolla con base en los siguientes ordenamientos:

- Estrategia Nacional de Energía (ENE)
- Prospectiva del Sector Eléctrico (PSE)
- Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (PRODESEN)<sup>1</sup>

De los cuales en esta tesis se analizan las versiones 2014-2028, 2016-2030 y 2016-2030 respectivamente. Estos son elaborados por la SENER en su facultad para dirigir el proceso de planeación, con base en lo establecido en la Ley de la Industria Eléctrica (H. Congreso

---

<sup>1</sup>Este documento sustituye el Programa de Obras e Inversiones del Sector Eléctrico desde el 2015

de la Unión de los Estados Unidos Mexicanos, 2014; H. Congreso de la Unión de los Estados Unidos Mexicanos, 1976).

En ellos se identifica la diversificación de los sistemas de generación de energía como un factor fundamental en la seguridad del suministro de electricidad, además de la necesidad de la aplicación de tecnologías con menor impacto ambiental.

Para la administración del servicio eléctrico en México, la SENER establece 9 regiones de control para el SEN, 7 de las cuales están interconectadas conformando el Sistema Interconectado Nacional (SIN), y se espera que las 2 restantes se incorporen para el 2021 (SENER, 2016a). Una de las regiones interconectadas, denominada Peninsular, está conformada por los estados de Campeche, Quintana Roo y Yucatán, por lo que es de especial interés para este trabajo.

**1.1. Estrategia Nacional de Energía (ENE) 2014-2028.** Este documento dirige el rumbo del sector energético del país a través del planteamiento de las necesidades y directrices para su solución, con un horizonte de 15 años, para dar a conocer la visión de este sector a mediano y largo plazos. La ENE indica que debido a los retos ambientales se requiere “una transformación en nuestros patrones de producción y uso de energía”.

En esta estrategia se toman en cuenta los bajos costos del gas natural, combustible al que le otorga mucha importancia a pesar de su volatilidad, dejando a un lado a la energía nuclear aunque en la ENE 2013-2027 (SENER, 2013), edición que toma como punto de partida, se considera la necesidad de incrementar esta última.

La ENE dice sobre el nuevo modelo energético en el país que “abre oportunidades para que a nivel regional se desarrollen proyectos energéticos y que los Estados encuentren en dicha Reforma un detonante de inversiones” y que “no basta con estudiar la disponibilidad energética, hay que optimizar los flujos de energía a lo largo del territorio nacional”.

En la región Sur-Sureste<sup>2</sup>, comprendida por los estados de Campeche, Chiapas, Guerrero, Oaxaca, Quintana Roo, Tabasco, Veracruz y Yucatán, la ENE identifica como oportunidades de desarrollo energético la posibilidad de instalar nueva capacidad de refinación para consumo interno y exportación.

**1.2. Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (PRODESEN) 2016-2030.** Este documento contiene la planeación de las actividades de generación, transmisión y distribución del SEN con base en la coordinación del Programa Indicativo para la Instalación y Retiro de Centrales Eléctricas (PIIRCE), que indica los requerimientos de capacidad de generación para satisfacer la demanda esperada del SEN, considerando los objetivos de energías limpias; y los Programas de Ampliación y Modernización para la Red Nacional de Transmisión y de las Redes Generales de Distribución, en el que el Centro Nacional de Control de Energía presenta los principales proyectos de expansión y modernización de las redes de transmisión y distribución del SEN. Para esta planeación se consideran como objetivos la seguridad energética y sustentabilidad.

---

<sup>2</sup>Para evitar ambigüedades, se aclara que en los documentos de planeación se usan dos divisiones regionales, una que establece la Presidencia de la República, comprendida por 5 regiones, entre las que se encuentra la región Sur-Sureste; y otra de 9, también denominadas áreas operativas, dispuesta por la CFE que incluye la peninsular conformada por los estados de Campeche, Quintana Roo y Yucatán. Para este trabajo se utiliza la segunda a menos que se especifique lo contrario.

## *Condiciones en México y la Península de Yucatán*

El PRODESEN indica que en el 2015 la capacidad instalada fue de 68,044 MW, con un aumento del 4 % respecto al 2014. El 28.3 % de la capacidad instalada en 2015 corresponde a energías limpias, con un incremento de 6.9 % respecto al año anterior. Respecto a la generación bruta, fue de 309,553 GWh, con una participación de energías limpias de 20.3 %. Las energías limpias presentaron una disminución de 3.7 % debido a la reducción en los niveles de precipitación que afectó a la generación hidroeléctrica, a pesar del aumento de 31.2 % en la generación por medio de cogeneración eficiente. Quintana Roo se encuentra entre las regiones con menos capacidad instalada, junto con Aguascalientes, Morelos, Zacatecas y Tlaxcala, que representan en conjunto solamente el 0.8 % del total. Estos también fueron los estados con menos generación de electricidad aportando solamente el 0.3 % del total.

La península cuenta con 5 regiones de transmisión: Lerma, Mérida, Cancún, Chetumal y Cozumel; enlazándose con el SIN a través de las regiones Lerma y Tabasco. Esta interconexión se realiza entre dos subestaciones de la primera y tres de la segunda, con una capacidad total de 1,150 MW. Además hay una línea de interconexión con Belice.

El consumo de energía del SEN durante el 2015 fue de 288,232 GWh, con un crecimiento de 2.9 % respecto al año anterior. De estos, el consumo en la península de Yucatán fue de 11,617 GWh, siendo la región de control con menor consumo del SIN<sup>3</sup>, sin embargo tuvo un crecimiento anual de 9.2 %.

En 2015, la demanda mínima del SIN fue de 19,341 MWh/h, mientras que la máxima fue de 39,840 MWh/h. La demanda máxima instantánea fue de 40,710 MW. En la península de Yucatán, la demanda máxima fue de 1,789 MWh/h el 20 de agosto.

El pronóstico de la demanda y consumo de energía se realiza en cuatro escenarios en función del producto interno bruto esperado y los precios de combustibles, denominados alto, planeación, bajo y base. De acuerdo al escenario de planeación, la tasa media de crecimiento anual en el consumo de energía del SEN será de 3.4 % entre 2016 y 2030, siendo las regiones de control Baja California Sur, Noreste, Noroeste y Peninsular, las de mayor tasa de crecimiento anual. En el caso de la región Peninsular, esta es de 3.8 %. La tasa media de crecimiento anual de la demanda máxima integrada proyectada para el SEN en el mismo periodo es de 3.7 % y las regiones antes mencionadas también tienen los mayores valores para esta variable. En la región peninsular, es de 4.1 %.

Según los resultados del procedimiento de planeación en el PIIRCE, se llevará a cabo el retiro de 15,829 MW de capacidad entre 2016 y 2030, de los que el 69 % es de termoeléctricas convencionales. Entonces para satisfacer la demanda de electricidad se requiere en el mismo periodo una capacidad adicional de 57,122 MW. De esta, un 62 % será de energías limpias, incluyendo un 12 % (7,045 MW) de cogeneración eficiente. Entre los proyectos de adición de capacidad se encuentran 3 de tecnología nuclear, con 1,360 MW cada uno, los cuales iniciarán su operación en los años 2028, 2029 y 2030.

Si se usa una definición un poco más estricta de energías limpias que excluya la cogeneración eficiente, la participación de las mismas es de 50.1 %. La tecnología con mayor incremento es el ciclo combinado, con 20,453 MW (36 %) y la bioenergía tendrá la menor participación<sup>4</sup>. La región peninsular tiene la segunda menor adición de capacidad, con 1,467.8 MW. De estos, Yucatán tiene el mayor incremento con 1,407 MW, el de Quintana Roo es de 60 MW y Campeche no tiene.

<sup>3</sup>En el SEN, Baja California Sur es la región de menor consumo con solamente 2,546 GWh

<sup>4</sup>Esta junto con la geotérmica representarán solamente el 1.67 %.

La exclusión de aquí en adelante de la cogeneración eficiente dentro de las energías limpias se debe a que esta se define como aquella cuyas emisiones son menores a 100 kg/MWh y para el caso de la cogeneración se usa como criterio una eficiencia mínima establecida por la CRE (H. Congreso de la Unión de los Estados Unidos Mexicanos, 2015). Las reducciones en las emisiones de dióxido de carbono usando esta tecnología se reducen hasta a la mitad (Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales República Dominicana, 2012). Durante la operación de las centrales nucleoelectricas, eólicas y solares prácticamente no hay emisiones de dióxido de carbono, aunque, como se indicó en el capítulo anterior, sí las hay en otras etapas del ciclo de vida. Según Spanth y Mann (2000), en una central de ciclo combinado de 505 MW, se emiten 499.1 kgCO<sub>2</sub>/MWh, de los cuales 371.2 kgCO<sub>2</sub>/MWh se dan durante la operación, es decir, 127.9 kgCO<sub>2</sub>/MWh no son emisiones directas por el uso del combustible para la generación de electricidad. Por lo tanto, a pesar de una reducción de las emisiones durante la operación de hasta 300 kgCO<sub>2</sub>/MWh (es decir, reduciendo a una quinta parte las emisiones durante la operación), todavía las emisiones de ciclo de vida serían de entre 3 y 6 veces (según los dos datos que se presentaron) mayores que las de las energías renovables y la nuclear.

La capacidad total esperada para el 2030 es de 109,367 MW, con un 42.5 % de energías limpias. Se estima una generación de 443,606 GWh de electricidad, con una participación de 36.4 % de energías limpias y un 4 % de generación eficiente y bioenergía.

Para el aspecto económico de la planeación, se busca la optimización de la ecuación 6.

$$(6) \quad CT = C_{Inv} + C_{OyM} + C_{ENS}$$

Donde  $CT$  es el valor presente del costo total,  $C_{Inv}$  es el de los costos de inversión,  $C_{OyM}$  el de los de operación y mantenimiento, y  $C_{ENS}$  el de la energía no suministrada. En este ejercicio de planeación no se están considerando las externalidades, a pesar de que pueden presentar un impacto en la comparativa de tecnologías.

**1.3. Prospectiva del Sector Eléctrico (PSE) 2016-2030.** Este documento presenta información sobre la condiciones y necesidades actuales del sector eléctrico del país, y su posible desarrollo en un horizonte de 15 años, tomando en cuenta lo que se expone en el PRODESEN.

La PSE reporta los mismos datos que el PRODESEN sobre el consumo de energía y capacidad instalada.

Esta prospectiva también resalta la importancia de los institutos de investigación y educación para una transición energética eficaz, debido al desarrollo tecnológico y formación de recursos humanos.

Según el PSE, en 2015 (y desde el 2006) la región peninsular presentó el precio medio de electricidad más alto, con respecto a las demás regiones, llegando en este año hasta \$2.07 pesos por kWh.

En el periodo 2005-2015, las ventas de energía eléctrica a Belice fueron de 255 GWh y a Guatemala 361.2 GWh, con una tasa media de crecimiento anual de 0.1 % y 71.4 % respectivamente. La línea de interconexión con Guatemala permite la exportación de 120 MW de potencia firme, con posibilidad de aumento hasta 200 MW. Con Belice hay una interconexión permanente de 50 MW.

## Condiciones en México y la Península de Yucatán

El precio del gas natural Henry Hub fue de \$2.6 dolares por millón de BTUs, y se espera, en el escenario de referencia, un aumento continuo durante unos años, llegando a que sea de casi el doble en el 2040 (\$4.9 USD/MBTU). En el escenario de precios bajos de petróleo llega a \$4.5 USD/MBTU en ese año y en el de precios altos a \$7.7 USD/MBTU. Esta variabilidad tiene un impacto importante en el costo de la energía generada por medio de centrales que lo usan como combustible. En los factores macroeconómicos, el documento indica la importancia del tipo de cambio al influir directamente en los precios de los combustibles, especialmente el gas natural ya que Estados Unidos es el principal proveedor. En el pronóstico se esperaba una tasa media de crecimiento anual de 5.4 %, con lo que se mantenía por debajo de los \$20 pesos por dolar, valor superado en noviembre del 2016 (Banco de México, 2017). Con esto, el promedio anual del costo de gas natural aumento de 2.554 USD/MBTU en 2016 a 3.285 USD/MBTU en lo que va del 2017 (Secretaría de Economía, 2017[b]), mientras el costo del uranio se mantiene a la baja (Secretaría de Economía, 2017[a]).

Respecto a la demanda máxima, se espera que en la región Peninsular llegue en el 2030 a 3,275 MWh/h, con una tasa media de crecimiento anual de 4.1 %, solamente por debajo de Baja California Sur y Noreste. El consumo bruto pronosticado para el SEN para el mismo año es de 476TWh, de los cuales 20.4 TWh corresponden a la región Peninsular, la cual tiene la tercera tasa media de crecimiento anual más alta<sup>5</sup>, con de 3.8 %.

La información presentada sobre retiro de capacidad, capacidad adicional, capacidad total y generación durante el periodo 2016-2030 coincide con la del PRODESEN ya que ambos documentos se basan en los datos del PIIRCE.

En el caso del año 2024, la participación de energías limpias en la generación es de 32.6 %, menor que la meta de 35 % planteada en la LTE. En la región peninsular, la generación será de 23,855.1 GWh para el 2030.

## 2. Necesidades Energéticas

En 2016, el consumo de energía de la península de Yucatán fue de 8,260 GWh, con 1,159 GWh en Campeche, 4,002 GWh en Quintana Roo y 3,098 GWh en Yucatán (SENER, 2010). En la Figura 2.1 se muestra la evolución del consumo total en la península de Yucatán y por estado entre 2002 y 2015. Se puede ver que hay un crecimiento considerable en la región, especialmente debido al incremento en el consumo en el estado de Quintana Roo.

Campeche generó 1,157 GWh durante 2016, Quintana Roo 74 GWh y Yucatán 5,826 GWh; la generación de toda la península fue de 7,057 GWh (SENER, 2010). Yucatán generó el 83 % del total de la península. El consumo de Quintana Roo representa el 48 % del total de la península de Yucatán, sin embargo solamente aportó el 1 % de la energía generada. La evolución del a generación de electricidad en la península entre 2002 y 2015 se presenta en la Figura 2.2. En esta se puede ver que, en contraste con el aumento en el consumo, la generación presenta un periodo de aumento y otro de decremento con lo que queda prácticamente igual al inicio y al final. Además la generación se ha mantenido concentrada en el estado de Yucatán.

Por medio del cociente de la diferencia entre la energía generada y la vendida, y las ventas de energía, se obtiene un valor denominado índice de balance<sup>6</sup>. Usando datos de la generación bruta y venta de electricidad por estado, del Sistema de Información Energética (SENER,

<sup>5</sup>Empatando con la región Noreste.

<sup>6</sup> $\frac{G-V}{V}$  donde G es la generación de electricidad, y V las ventas de energía eléctrica, por lo que un valor mayor a 0 indica superávit, uno menor, un déficit y 0 si está en equilibrio.

2010), se calcularon los índices de balance para la península de Yucatán y los estados que la conforman de manera individual con lo que se obtuvo la Figura 2.3. Se puede ver que el índice, tanto para los estados como para la península, va disminuyendo con el tiempo y que Quintana Roo importa prácticamente toda la energía que consume. En el 2016, este índice fue de 0 para Campeche, -0.098 para Quintana Roo, 0.88 para Yucatán y de -0.146 en toda la península.

Hasta 2015 operaban en la península 30 centrales con una capacidad total de 2,244 MW (SENER, 2016b). El 68.3 % de la capacidad total estaba en el estado de Yucatán, mientras campeche y Quintana Roo contaban con 18.4 % y 13.4 % respectivamente (SENER, 2016b). Respecto a la participación por tecnología, el 99.9 % pertenecía a energías no-limpias, como se puede ver en la Tabla 2.1 (SENER, 2016b). De estas, 24 centrales serán retiradas en el periodo 2016-2030. Considerando como especies las diferentes fuentes primarias de energía, el índice Shannon (ecuación 4) es de 0.88 con una equidad (ecuación 5) de 0.63.

Hay 32 proyectos de adiciones planeados para el periodo 2016-2030, con una capacidad de 3,210 MW (SENER, 2016b). 92 % de estos son para el estado de Yucatán, 6.2 % para Campeche y 2.1 % para Quintana Roo (SENER, 2016b). Las energías limpias representan un 39 % de las adiciones. La Tabla A.1 muestra los proyectos y algunas de sus características.

La capacidad instalada en la región peninsular en 2030 sería de 4,489 MW y el 88 % se encontraría en Yucatán, mientras el 10 % y 2 % en Campeche y Quintana Roo respectivamente

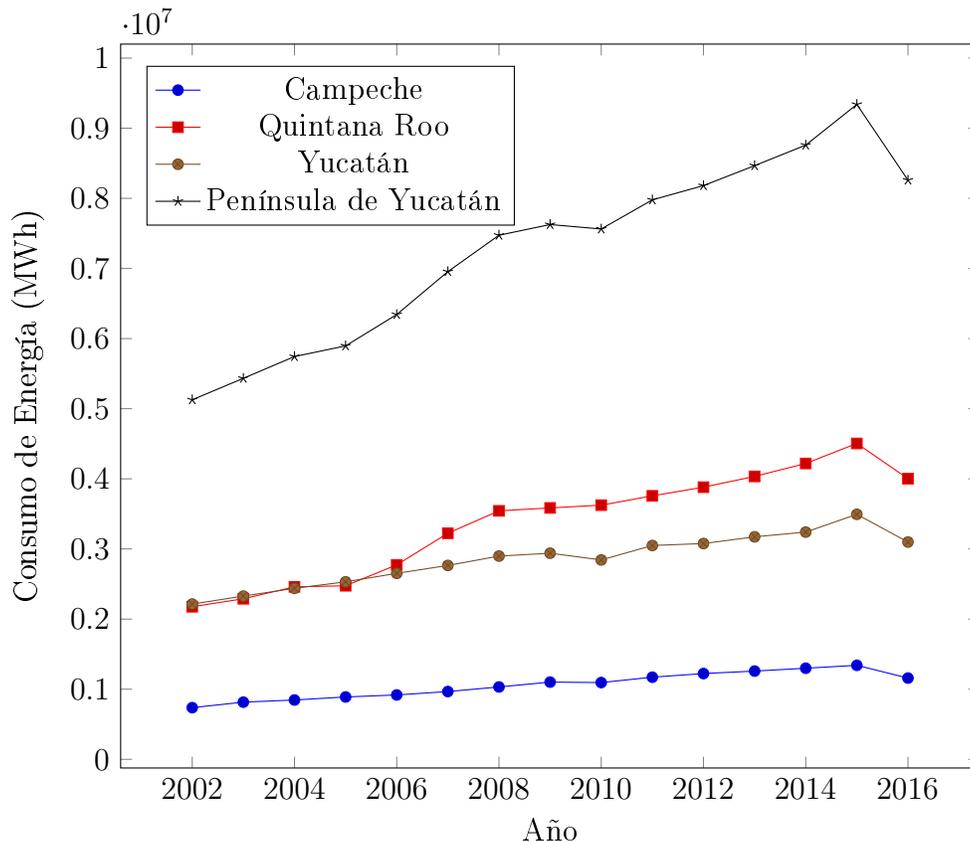


FIGURA 2.1. Consumo de Energía en la Península de Yucatán (SENER, 2010)

Condiciones en México y la Península de Yucatán

(SENER, 2016b). En la Tabla 2.2 se encuentra la participación por tecnología. Considerando la cogeneración eficiente como energía limpia se obtiene una participación en esta categoría de 60 %, pero se reduce a 27.9 % si esta tecnología no se considera como limpia, ya que la cogeneración eficiente representa el 32.2 % de la capacidad instalada. El índice Shannon

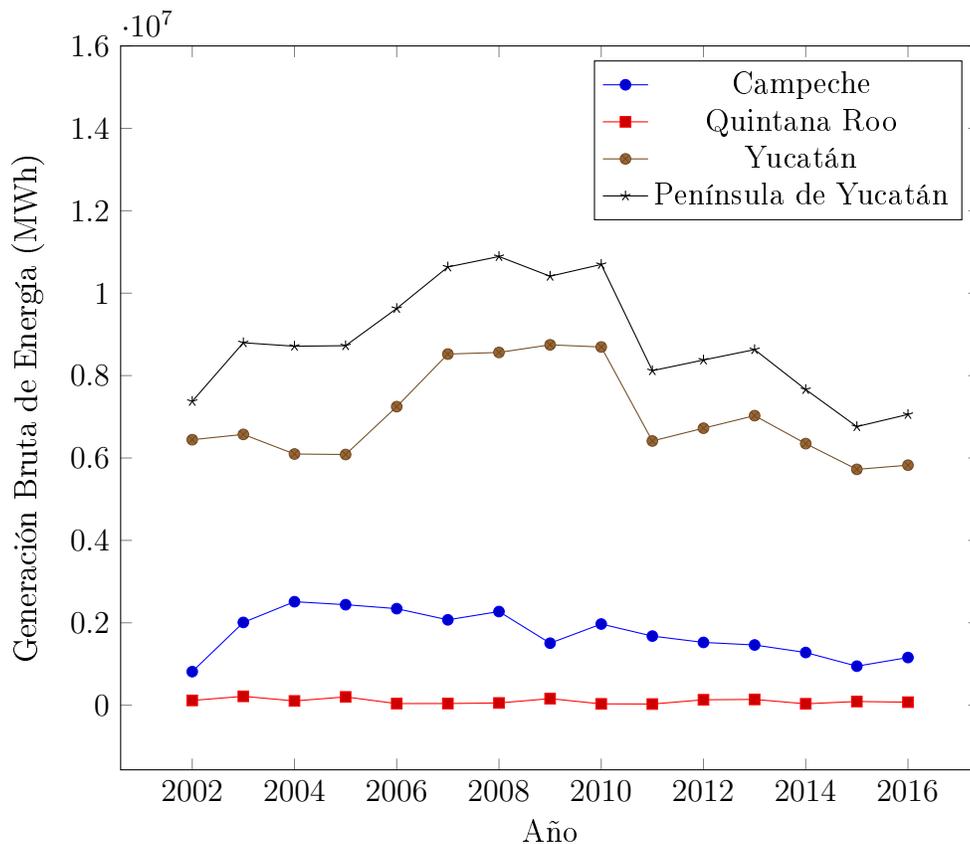


FIGURA 2.2. Generación de Energía en la Península de Yucatán (SENER, 2010)

Tecnología	Capacidad (MW)	Participación
<b>Energías No-limpias</b>		
Ciclo Combinado	1,481	66.0 %
Combustión Interna	3.2	0.1 %
Turbogás	420	17.9 %
Termoeléctrica Convencional	355.5	15.8
<i>Subtotal</i>	<i>2,242.3</i>	<i>99.9 %</i>
<b>Energías Limpias</b>		
Eólica	1.5	0.1 %
<i>Subtotal</i>	<i>1.5</i>	<i>0.1 %</i>
<b>Total</b>	2,243.8	

TABLA 2.1. Participación por tecnología en la capacidad instalada en la península de Yucatán en 2015 (SENER, 2016b).

considerando la fuente primaria utilizado es de 1.03 con una equidad de 0.64, mostrando una mejora muy pequeña a pesar de aumentar la matriz energética al incluir la energía solar.

Tecnología	Capacidad (MW)	Participación
<b>Energías No-limpias</b>		
Ciclo Combinado	1,768.49	39.4 %
Combustión Interna	11.62	0.3 %
Turbogás	12.5	0.3 %
Cogeneración Eficiente	1,443.88	32.2 %
<i>Subtotal</i>	<i>3,236.5</i>	<i>72.1 %</i>
<b>Energías Limpias</b>		
Bioenergía	1.35	0 %
Eólica	427.5	9.5 %
Solar Fotovoltaica	823.52	18.3 %
<i>Subtotal</i>	<i>1,252.37</i>	<i>27.9 %</i>
<b>Total</b>	<b>4,488.86</b>	

TABLA 2.2. Participación por tecnología en la capacidad instalada en la península de Yucatán en 2030 (SENER, 2016b).

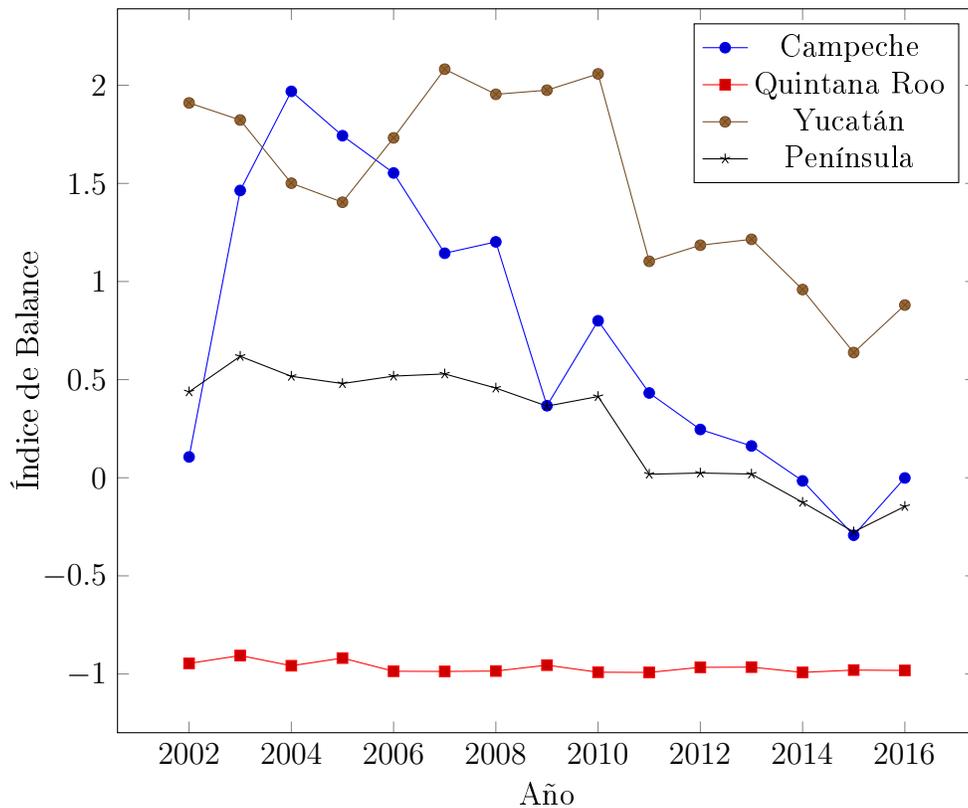


FIGURA 2.3. Índice de Balance

## Condiciones en México y la Península de Yucatán

En la región peninsular se espera para 2030 un consumo total de 20,416 MWh y una generación de 23,855 MWh (SENER, 2016a).

Se debe tomar en cuenta que la demanda de energía no es constante o con un simple incremento gradual, presenta variaciones a lo largo del día y del año. La Figura 2.4 muestra la demanda horaria durante los meses de enero y julio del 2008 en la región peninsular, presentándose una demanda mínima en el primero de 781MWh<sup>7</sup> a las 17 horas y en el segundo de 954 MWh a las 21 horas (Maqueda Zamora y Sánchez Viveros, 2008). Además se puede estimar que los valores mínimos son de 450 MWh/h y 650 MWh/h por lo que en promedio hay una variación de aproximadamente 37%. En la Figura 2.5 se puede ver una gráfica de la demanda horaria del SIN durante el 2015 como ejemplo de la variación que se puede presentar a lo largo de este periodo. Según el pronóstico del PIIRCE, en 2030 la demanda máxima en la región peninsular será de 3275 MWh/h el 25 de junio a las 23 horas, y la mínima de 945 MWh/h el 26 de octubre a las 2 horas. Esto indica que se requerirán aproximadamente 1,000 MW de potencia ininterrumpida durante ese año. A esta demanda mínima en un periodo de tiempo determinado se le denomina carga base.

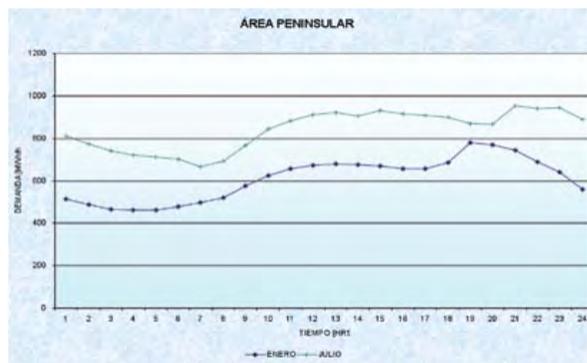


FIGURA 2.4. Curva de demanda horaria en la región peninsular durante enero y Julio del 2008 (Maqueda Zamora y Sánchez Viveros, 2008).

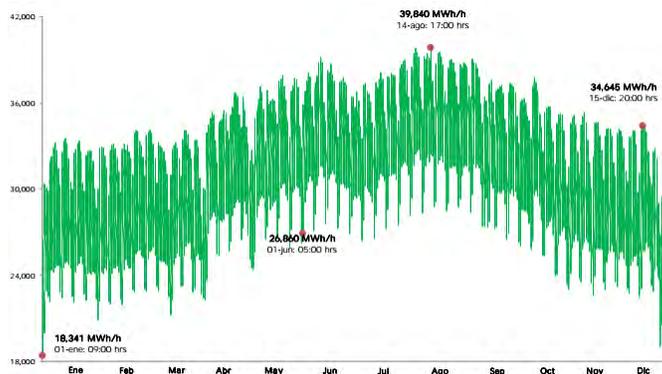


FIGURA 2.5. Curva de demanda horaria del SIN durante el 2015 (SENER, 2016a).

<sup>7</sup>Las unidades deben ser de potencia, en este caso MWh/h, pero los autores lo reportan con las unidades de energía MWh.

### **3. Consideraciones Ambientales**

A nivel nacional existen metas para la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> y uso de energías no limpias. La ley de transición energética establece en su artículo tercero transitorio una meta de participación mínima de energías limpias en generación de electricidad de 35 % para 2024 (H. Congreso de la Unión de los Estados Unidos Mexicanos, 2015). En la Estrategia de Transición Para Promover el Uso de Tecnologías y Combustibles Limpios se establecen como metas el 35 %, 37.7 % y 50 % de participación de energías limpias en la generación de electricidad para 2024, 2030 y 2050 respectivamente (Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía, 2016). La Ley General de Cambio Climático (H. Congreso de la Unión de los Estados Unidos Mexicanos, 2012) plantea en su artículo segundo transitorio una reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero en un 30 % del estimado por la proyección inercial para el 2020 (que es de 960 Megatoneladas de CO<sub>2</sub> equivalentes (MtCO<sub>2</sub>e) (SEMARNAT, 2013)) y a un 50 % de las registradas en el 2000 para el 2050, alcanzando un nivel máximo de 320 MtCO<sub>2</sub>e (SEMARNAT, 2013). La Estrategia Nacional de Cambio Climático (SEMARNAT, 2013) plantea entre sus temas estratégicos acelerar la transición energética hacia fuentes de energía limpia y una de sus líneas de acción es considerar dentro de la diversificación del parque de generación, la implementación de un programa nuclear como posible sustituto al uso de combustibles fósiles.

Si la cogeneración eficiente no se considera energía limpia, la meta establecida para el año 2030 no se cumple al ser de solamente 36.4 % como vimos anteriormente. Con una capacidad de energías limpias de 27.9 % y debido a su intermitencia, tampoco a nivel regional en la península de Yucatán, se cumple con este objetivo.

### **4. Consideraciones Económicas**

**4.1. Certificados de Energías Limpias.** Actualmente el mercado eléctrico mexicano cuenta con un mecanismo de certificados de energías limpias para promover la generación de electricidad con menor impacto ambiental, en el que se obliga a los generadores a producir un porcentaje mínimo de la electricidad con tecnologías limpias. Los certificados están sujetos a la compraventa por lo que un generador que no cumpla con el requisito de energías limpias puede comprar certificados para cubrirlo, permitiendo a aquellos que lo exceden venderlos.

Esto beneficia a las centrales eléctricas limpias ya que constituye un ingreso adicional, y penaliza a las energías más contaminantes. Según la IMCO (2014), el impacto potencial en 2015 en la energía nuclear sería de una reducción en el costo de 8 % mientras las centrales de ciclo combinado tendrían un incremento de 14 %.

### **5. Consideraciones Sociales**

**5.1. Aceptación.** Debido a la importancia de la opinión pública en las decisiones políticas del país, es necesario tomar en cuenta dentro del panorama el conocimiento sobre riesgos, beneficios y la aceptación del uso de energía nuclear. Los resultados de estudios de opinión pública en México realizados por el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares en los años 2006, 2008 y 2013 muestran que el 50 % gente percibe de manera favorable el uso de reactores nucleares para la generación de electricidad en comparación con el 43 % que lo percibe como desfavorable, sin embargo sí existe cierta oposición a la construcción de nuevas centrales nucleares con un 61 % en contra, especialmente por parte de la gente

que no está informada respecto a las fuentes de generación de energía y la energía nuclear (Palacios Hernández, 2016).

Esto indica que a la par que se elaboran estudios técnicos, propuestas y planes para la expansión de la energía nuclear en México, se requiere de un esfuerzo para informar de manera adecuada a la población respecto al tema para lograr una mejor aceptación y reducir los temores existentes.

## **6. Energía nuclear en México y la península de Yucatán**

En este capítulo se pudo ver que existen necesidades energéticas y ambientales en México y en la península de Yucatán, que pueden ser cubiertas por la energía nuclear, por lo que es pertinente la elaboración de una propuesta tecnológica para su uso. También se presentaron dos retos que es necesario tomar en cuenta si se pretende expandir el parque nuclear.

## Comparativa de Diseños

En el Capítulo 2 se vieron las oportunidades y retos del uso de la energía nuclear para la generación de electricidad en México, y específicamente en la península de Yucatán. En este capítulo se comparan algunos diseños de reactores nucleares y sus centrales por diferentes métodos de Análisis de Decisiones Multi Criterio (MCDA, Multiple Criteria Decision Analysis) considerando aspectos generales y locales, con el fin de determinar las mejores opciones para el incremento de la capacidad nucleoelectrónica.

### 1. Análisis de Decisiones Multi Criterio (MCDA, Multiple Criteria Decision Analysis)

La selección del diseño de reactor nuclear más adecuado para su utilización en la península de Yucatán es un problema de toma de decisiones. Como la mayoría de estos problemas en la vida real, es complejo e influyen muchos aspectos. Para la solución de este tipo de problemas, existen métodos de MCDA que ayudan a sistematizar el proceso para hacerlo más racional y eficiente. En estos, se comparan las características elegidas, denominadas criterios, de diferentes opciones, a las que se les llama alternativas, para elegir la más adecuada, clasificarlas, ordenarlas o reducir las. Estos métodos no llevan a una solución única y absoluta ya que dependen de las preferencias del tomador de decisiones. Diferentes métodos también pueden llevar a diferentes resultados aún bajo condiciones similares debido a que trabajan de forma distinta, por lo que es necesario utilizar aquellos que sean más adecuados para la aplicación específica según los criterios y objetivos elegidos (por ejemplo, que permitan el uso de criterios cualitativos, cuantitativos o se quiere obtener un conjunto de alternativas adecuadas, un ranking o seleccionar solamente una).

Un problema de este tipo puede ser expresado en forma matricial

$$(7) \quad \mathbf{M} = \begin{matrix} & C_1 & C_2 & \cdots & C_n \\ A_1 & a_{1,1} & a_{1,2} & \cdots & a_{1,n} \\ A_2 & a_{2,1} & a_{2,2} & \cdots & a_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_m & a_{m,1} & a_{m,2} & \cdots & a_{m,n} \end{matrix}$$

en la cual el elemento  $a_{i,j}$  representa el valor correspondiente de la alternativa  $A_j$  para el criterio  $C_i$ , teniendo  $m$  alternativas y  $n$  criterios.

Normalmente se les aplica algún método de normalización a estos valores y se toma en cuenta también el vector

$$\vec{w} = (w_1, w_2, \dots, w_n)$$

en el que cada componente representa el peso que le atribuye el decisor al criterio  $i$ . Los pesos de los criterios también pueden estar normalizados.

**1.1. MCDA en la Planeación Energética.** El uso de estos métodos se ha popularizado en la planeación energética para diferentes aspectos, especialmente motivado por el fin de conseguir un desarrollo energético sustentable (Pohekar y Ramachandran, 2004; Loken, 2007; Wang y col., 2009; Kumar y col., 2017). Con estos, se sustituye el enfoque de un solo criterio que buscaba satisfacer la demanda con el menor costo posible por uno más sustentable que incluye factores ambientales, económicos y sociales. Pohekar y Ramachandran (2004) clasifican la selección de sitio y tecnología como planeación de proyectos y observan que de manera general los métodos más utilizados son Proceso de Jerarquía Analítica (AHP, Analytic Hierarchy Process), Método de Organización por Escala de Preferencias para Evaluación Enriquecida (PROMETHEE, Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation) y Eliminación y Elección Representando la Realidad (ELECTRE, Elimination Et Choix Traduisant la Réalité). También Wang y col. (2009) encuentran que el método AHP es el más usado.

En México, Reyes Ramírez (2006), Barragán Martínez (2008) y Espinosa Sosa (2010) han usado diferentes métodos de toma de decisiones multicriterio para la comparación de diseños de reactores nucleares con el fin de proponer el uso del más adecuado en el país.

Reyes Ramírez (2006) utiliza un Sistema de Inferencia Difuso (FIS, Fuzzy Inference System) para comparar los diseños ABWR, Reactor de Agua en Ebullición Económico Simplificado (ESBWR, Economic Simplified Boiling Water Reactor), EPR, AP 1000, y Reactor Modular de Cama de Esferas (PBMR, Pebble Bed Modular Reactor), utilizando como criterios la potencia eléctrica, eficiencia de la planta, factor de disponibilidad, tiempo de construcción, experiencia en México, estado del avance de la tecnología, generación de empleos, costo de inversión, costo de operación y mantenimiento, costo de combustible, enriquecimiento de combustible, quemado de combustible, posibilidad de reprocesamiento, características de no proliferación, frecuencia de daño al núcleo, frecuencia de grandes liberaciones tempranas, diseño sísmico, eventos externos, dosis a trabajadores, y emisiones al aire. El diseño AP 1000 resulta el mejor calificado de manera general al considerar diferentes ponderaciones para los criterios anteriormente mencionados.

Barragán Martínez (2008) compara los diseños AP 1000, PBMR y Reactor Modular de Helio con Turbina de Gas (GT-MHR, Gas Turbine - Modular Helium Reactor) por medio de los métodos de normalización, Modelo de Suma Ponderada (WSM, Weighted Sum Model), FIS y AHP. Usando como criterios potencia, eficiencia, factor de disponibilidad, tiempo de construcción, vida útil, costo de inversión, costo de operación y mantenimiento, costo de combustible, madurez tecnológica, generación de empleos, enriquecimiento, posibilidad de reprocesamiento, no proliferación, quemado del combustible, frecuencia de daño al núcleo, frecuencia de grandes liberaciones tempranas, dosis a trabajadores, y emisiones al aire encuentra que utilizando los cuatro métodos el diseño mejor calificado es el PBMR de manera global.

Espinosa Sosa (2010) usa los métodos de WSM, Modelo de Producto Ponderado (WPM, Weighted Product Model), AHP, ELECTRE y Técnica para Ordenar las Preferencias mediante Similitud a la Solución Ideal (TOPSIS, The Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) usando como criterios potencia eléctrica, eficiencia, enriquecimiento

de combustible, frecuencia de daño al núcleo, costo instantáneo de inversión, certificación por la NRC, tiempo de preparación del sitio y excavación, tiempo de construcción, experiencia nacional por tipo, experiencia mundial por tipo, experiencia operacional, y uso predominante de sistemas pasivos, para comparar los diseños ABWR, EPR, Reactor Avanzado de Agua a Presión (APWR, Advanced Pressurized Water Reactor), AP 1000, y ESBWR obteniendo como resultado la selección del modelo ABWR como la mejor opción.

## 2. Criterios de valuación

El primer paso es establecer los criterios de evaluación, es decir las características que servirán de referencia. También se debe definir la preferencia de los criterios (si se prefieren valores mayores o menores) y el peso que se le asigna a cada criterio.

A continuación se describen los elegidos para este trabajo:

**PE: Potencia Eléctrica Neta (MWe):** Es el valor nominal de la potencia eléctrica que el reactor puede aportar de manera continua a la red eléctrica según su diseño. Ya que un incremento en la potencia puede implicar un incremento en el costo de inversión y una reducción en el costo nivelado de generación, estos efectos se toman en cuenta en los criterios correspondientes, por lo que consideran preferibles los valores mayores para poder cubrir una mayor parte de las necesidades energéticas.

**QC: Quemado de Combustible (GWd/t):** Es la cantidad de energía obtenida por tonelada de uranio gastado<sup>1</sup>. Se prefiere un mayor quemado de combustible ya que significa un mejor aprovechamiento del uranio.

**FDN: Frecuencia de Daño al Núcleo (años<sup>-1</sup>):** Frecuencia con la que se espera que sucedan eventos que dañen la integridad del combustible en el reactor, siendo su inverso el tiempo entre eventos de este tipo. Es un resultado del análisis probabilístico de riesgos y se prefiere el menor valor posible.

**ER: Exposición Ocupacional a Radiación (Persona-Sv/año):** Dosis de radiación recibida por un trabajador de la central durante un año de operación. Se desean valores más bajos en este criterio.

**PNO: Periodo de Funcionamiento sin Necesidad de Operador (horas):** Es el tiempo durante el cual la planta puede mantener el enfriamiento y mitigar los efectos de un accidente sin necesidad de la acción de un operador. Se prefieren los valores más grandes.

**FD: Factor de Disponibilidad (%):** Porcentaje del tiempo que la planta esta disponible para su operación durante un periodo de un año. Se considera mejor cuanto mayor se su valor.

**EP: Enriquecimiento Promedio (%):** Proporción de U-235 en el combustible respecto al total de la masa de uranio en el combustible<sup>2</sup>. Ya que este varía a lo largo del ciclo y según la posición del combustible, se utiliza el enriquecimiento del combustible de recarga en el núcleo en equilibrio. Este tiene impactos opuestos en el costo y quemado de combustible, de modo que al aumentar el enriquecimiento promedio se

---

<sup>1</sup>El uranio gastado es aquel que ha cambiado su concentración de isotopos y elementos hasta un punto en el que ya no se considera apto para su uso en el reactor.

<sup>2</sup>Aunque se usa el término enriquecimiento, esta puede ser la proporción que se encuentra en el uranio natural para el caso de los reactores que utilizan este tipo de combustible, como los CANDU.

incrementa el quemado de combustible (generando más energía por unidad de combustible usado) lo cual es conveniente, pero también aumenta el precio. Se prefieren valores más bajos.

**VU: Vida Útil (años):** Es el tiempo que se espera que la central pueda mantenerse en operación según su diseño. Es preferible una vida útil más larga.

**TC: Tiempo de Construcción (meses):** Es el tiempo planeado para la construcción de la central, iniciando desde el vaciado del primer concreto hasta el inicio de la operación comercial. Mientras menor sea su valor resulta más rápido responder a las necesidades de la red lo cual es preferible.

**CN: Costo Nivelado de Generación (US\$/MWh):** Valoración económica del costo del sistema de generación de electricidad que incluye todos los costos a lo largo de la vida útil del proyecto: la inversión inicial, operación y mantenimiento, el costo de combustible, costo de capital, desmantelamiento, etc. Son recomendables los valores más bajos.

**CI: Costo Instantáneo (Overnight) de Inversión (US\$):** Costo que tendría la central si la construcción se completara en un periodo muy corto de tiempo (por ejemplo una noche, iniciando la construcción un día y terminando al siguiente), con lo que se mantiene el valor del dinero y no se presentan intereses. Se prefieren valores más bajos.

**EO: Experiencia de Operación:** Existencia de experiencia de operación del diseño de reactor. Ya que se trata de un dato booleano, se considera una ventaja de 2 a 1 para los reactores con experiencia, teniendo entonces como opciones 2 (con experiencia) y 1 (sin experiencia), siendo preferible el valor más alto.

**ET: Experiencia en México por Tipo:** Experiencia en México en el tipo de reactor. La experiencia en México con los reactores del tipo BWR representa una ventaja por lo que este criterio toma como valores 2 si el diseño comparte este tipo de reactor y 1 en caso de no hacerlo, del mismo modo que en Experiencia de operación.

**2.1. Clasificación y Ponderación de los Criterios.** Una vez definidos los criterios de evaluación, se clasificaron en dos grupos, aquellos relacionados con los aspectos técnicos de la generación de energía y los que no lo son. Para la ponderación se utilizaron dos métodos diferentes, uno por asignación directa y otro basado en el AHP. Los pesos de los criterios resultantes deben estar normalizados por grupo, y los pesos de los dos grupos también.

*2.1.1. Asignación Directa.* En este método se asignan los valores directamente a los criterios y grupos de criterios.

Se considera que ambos grupos deben tener un valor similar, sin embargo los criterios técnicos se consideran ligeramente más importantes ya que indican el desempeño del reactor, además de que algunos criterios no técnicos están influenciados por estos. De los criterios técnicos destacan la potencia eléctrica neta, la frecuencia de daño al núcleo, el factor de disponibilidad y la vida útil, y entre los no técnicos, los costos nivelados de generación e instantáneo de inversión. Las variaciones entre los demás criterios dentro de cada grupo son menores. La Tabla 3.1 muestra los criterios con su respectiva ponderación.

*2.1.2. Metodología Basada en el Proceso de Jerarquía Analítica.* El otro método utilizado para definir los pesos de los criterios se basa en el AHP. En el AHP se parte de una matriz de comparativas por cada criterio donde cada elemento representa la razón entre el

valor de una alternativa con respecto a la otra, por lo que se parte de comparaciones por pares de alternativas para cada característica. También se hace una matriz de comparaciones entre pares de criterios para obtener su ponderación. Entonces es posible generar una matriz de alternativas y criterios estimando los valores de los elementos. Esto, junto con un análisis de consistencia, permite la comparativa de criterios cualitativos para obtener valores cuantitativos equivalentes. Además simplifica la asignación de valores y pesos al no tener que tomar en cuenta todos a la vez, considerando solamente la importancia relativa de ellos en cada par. Para esto se puede considerar una tabla de comparaciones como la Tabla 3.2. Para más información sobre este método, se puede consultar Brunelli (2015).

Utilizando la Tabla 3.2 se hicieron las matrices de comparación de la importancia de los criterios técnicos,

$$\mathbf{R} = \begin{matrix} & PE & QC & FDN & ER & PNO & FD & EP & VU \\ \begin{matrix} PE \\ QC \\ FDN \\ ER \\ PNO \\ FD \\ EP \\ VU \end{matrix} & \begin{pmatrix} 1 & 5 & 3 & 9 & 7 & 3 & 9 & 3 \\ 0.2 & 1 & 0.2 & 5 & 3 & 0.2 & 5 & 0.2 \\ 0.333 & 5 & 1 & 7 & 5 & 0.5 & 5 & 1 \\ 0.111 & 0.2 & 0.143 & 1 & 0.333 & 0.2 & 2 & 0.143 \\ 0.143 & 0.333 & 0.2 & 3 & 1 & 0.2 & 3 & 0.2 \\ 0.333 & 5 & 2 & 5 & 5 & 1 & 7 & 1 \\ 0.111 & 0.2 & 0.2 & 0.5 & 0.333 & 0.143 & 1 & 0.143 \\ 0.333 & 5 & 1 & 7 & 5 & 1 & 7 & 1 \end{pmatrix} \end{matrix}$$

y no técnicos,

$$\mathbf{R} = \begin{matrix} & TC & CN & CI & EO & ET \\ \begin{matrix} TC \\ CN \\ CI \\ EO \\ ET \end{matrix} & \begin{pmatrix} 1 & 0.25 & 0.333 & 0.5 & 2 \\ 4 & 1 & 2 & 3 & 4 \\ 3 & 0.5 & 1 & 2 & 4 \\ 2 & 0.333 & 0.5 & 1 & 2 \\ 0.5 & 0.25 & 0.25 & 0.5 & 1 \end{pmatrix} \end{matrix}$$

Ya que los grupos de criterios son solamente dos, la asignación se puede hacer de manera directa.

Criterios de Evaluación			
Técnicos	55 %	No Técnicos	45 %
Potencia Eléctrica Neta	24 %	Tiempo de Construcción	17 %
Quemado de Combustible	10 %	Costo Nivelado de Generación	26 %
Frecuencia de Daño al Núcleo	17 %	Costo Instantaneo de Inversión	23 %
Exposición Ocupacional a Radiación	5 %	Experiencia de Operación	19 %
Periodo de Funcionamiento sin Necesidad de Operador	7 %	Experiencia por Tipo	15 %
Factor de Disponibilidad	16 %		
Enriquecimiento Promedio	5 %		
Vida Útil	16 %		

TABLA 3.1. Ponderación de criterios utilizando asignación directa

### Comparativa de Diseños

Valor del elemento $a_{jk}$	Interpretación
1	$j$ y $k$ son igual de importantes
3	$j$ es ligeramente más importante que $k$
5	$j$ es más importante que $k$
7	$j$ es mucho más importante que $k$
9	$j$ es absolutamente más importante que $k$
2,4,6 y 8	Valores intermedios

TABLA 3.2. Valores para comparación por pares

Estas matrices se usaron como datos de entrada en el software PriEsT (Siraj, Mikhailov, y Keane, 2015), que es un programa para la solución de problemas MCDA por medio del AHP. La proporción de consistencia (CR, Consistency Ratio), que indica que tan consistentes son las comparaciones por pares, de estas matrices es de 0.02 para los no-técnicos y 0.066 para los técnicos, menor que el 0.1 recomendado para considerar válido el método (Brunelli, 2015). Para obtener el valor de los pesos de los criterios, se utilizó la media geométrica y los resultados se presentan en la Tabla 3.3

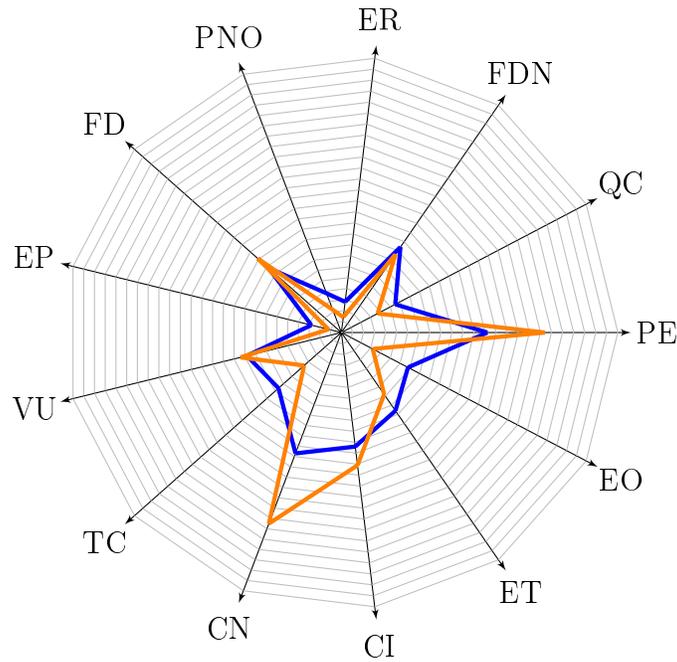
Criterios de Evaluación			
Técnicos	55 %	No Técnicos	45 %
Potencia Eléctrica Neta	33.5 %	Tiempo de Construcción	10.0 %
Quemado de Combustible	6.8 %	Costo Nivelado de Generación	41.0 %
Frecuencia de Daño al Núcleo	15.6 %	Costo Instantaneo de Inversión	26.8 %
Exposición Ocupacional a Radiación	2.5 %	Experiencia de Operación	15 %
Periodo de Funcionamiento sin Necesidad de Operador	4 %	Experiencia por Tipo	7.2 %
Factor de Disponibilidad	18.4 %		
Enriquecimiento Promedio	2.1 %		
Vida Útil	17.1 %		

TABLA 3.3. Ponderación de criterios utilizando una metodología tipo AHP

2.1.3. *Comparación.* La Tabla 3.4 muestra una comparación entre la ponderación de los criterios obtenida por los dos métodos utilizados. El diagrama de Kiviat de la Figura 3.1 se genera con los datos de esta Tabla.

Criterios de Evaluación		
Criterio	A. Directa(%)	AHP(%)
<b>Técnicos</b>		
Potencia Eléctrica Neta	13.2	18.4
Quemado de Combustible	5.5	3.7
Frecuencia de Daño al Núcleo	9.4	8.6
Exposición Ocupacional a Radiación	2.8	1.4
Periodo de Funcionamiento sin Necesidad de Operador	3.8	2.2
Factor de Disponibilidad	8.8	10.1
Enriquecimiento Promedio	2.8	1.2
Vida Útil	8.8	9.4
<b>No Técnicos</b>		
Tiempo de Construcción	7.6	4.5
Costo Nivelado de Generación	11.7	18.5
Costo Instantaneo de Inversión	10.4	12.1
Experiencia de Operación	8.6	6.8
Experiencia por Tipo	6.8	3.2

TABLA 3.4. Ambos Métodos



Asignación Directa

Metodología tipo AHP

FIGURA 3.1. Diagrama de Kiviati de las ponderaciones por asignación directa y metodología tipo AHP

En general, ambos métodos producen resultados similares. Se puede notar que la diferencia entre los criterios mencionados como destacados en el método de asignación directa y los demás criterios resulta más marcada en el resultado de la metodología tipo AHP. En este caso destacan especialmente la potencia eléctrica neta y el costo nivelado de generación.

### 3. Alternativas

Una vez definidos los criterios, es necesario elegir las alternativas a comparar. Actualmente existen diferentes diseños de reactores nucleares avanzados, con sus correspondientes plantas nucleoeléctricas, que se encuentran disponibles comercialmente o lo estarán próximamente. Partiendo de las opciones disponibles de diseños de reactores nucleares, es prudente reducir el número de alternativas estableciendo condiciones con el fin de solamente considerar aquellas que son aceptables. Las condiciones elegidas para este trabajo son las siguientes:

1. Estar catalogado como reactor avanzado (Gen III/III+).
2. Tener un propósito comercial.
3. Estar diseñado para su instalación fija en tierra (Land-based).
4. Contar con unidades en operación o construcción en el caso de los reactores grandes.
5. Estar al menos en proceso de aprobación del diseño o estar en construcción en el caso de los reactores pequeños<sup>3</sup>.

En esta tesis se analizan los siguientes diseños con fines comparativos, realizando una breve descripción de sus características cualitativas y cuantitativas:

- ABWR.
- AP 1000.
- APR 1400.
- VVER-1200 [V-491].
- NuScale.
- SMART.
- CAREM.

La matriz con los datos de cada diseño se encuentra en el apéndice B

**3.1. Reactor Avanzado de Agua en Ebullición (ABWR, Advanced Boiling Water Reactor).** El ABWR, es una evolución del reactor de agua en ebullición tradicional en el que se han implementado diversas mejoras. Este es el primer diseño de reactor de generación III construido, y pertenece al consorcio formado por General Electric-Hitachi y Toshiba. Representa un diseño completo para una central nucleoeléctrica de 1350 MWe (Mega Watts Eléctricos).

El principal criterio de diseño de la planta ABWR estándar comprende dos categorías de requerimientos básicos: La función de generación de potencia y la de seguridad. La primera incluye el control de la temperatura en el núcleo, la integridad del mismo en condiciones normales y transitorios operacionales anormales, la respuesta automática y manual de cambios de carga, además de evitar condiciones que requieran el funcionamiento de sistemas o características de seguridad. La segunda tiene como objetivo que la liberación de materiales radiactivos al ambiente no exceda los límites de regulación durante la operación normal,

---

<sup>3</sup>Aunque el que está en construcción sea solamente un prototipo, si este es para validar el uso comercial del diseño

transitorios anormales ni accidentes, incluyendo la presencia de fenómenos naturales como terremotos, inundaciones, y tormentas. Una de sus principales características es el remplazo del sistema externo de recirculación por 10 bombas internas, montadas en la parte inferior de la vasija. Debido a esto, el control de reactividad se mantiene por una combinación de cambios de flujo en el núcleo, posición de las barras de control e inclusión de absorbedores quemables en el combustible.

Se ha simplificado la activación de los sistemas de seguridad, que están en tres divisiones independientes y redundantes. Además cuenta con sistemas alternos de seguridad para la inserción de las barras de control, apagado remoto, inyección de una solución absorbente de neutrones y control de agua de alimentación y monitoreo de neutrones.

Los sistemas de control e instrumentación proporcionan medios manuales y automáticos para la operación de la planta. Incorpora la automatización extensiva de las acciones de operación durante el arranque o apagado normal de la planta y maniobras del rango de potencia, seleccionadas cuidadosamente para asegurar que el control primario de la planta se mantenga con el operador, incluyendo su intervención en cualquier momento en caso de ser necesario. A causa de esta y otras características del diseño del cuarto de control, es posible que un solo operador realice las funciones de control y monitoreo en condiciones normales o de accidente, sin embargo la organización del equipo de operación está diseñada para tener dos operadores normalmente en la consola.

En caso de accidente severo, el calor irradiado de los escombros del núcleo fundirá una válvula que libera agua desde la alberca de supresión. Si la presión se acerca al límite de diseño, un disco de ruptura localizado en un respiradero habitual se abrirá, creando una trayectoria desde la alberca de supresión hasta la atmósfera para liberar vapor. Debido a la reducción en el volumen de la planta y la modularización de sus componentes, se logran reducir el costo y tiempo de construcción.

La experiencia con estos reactores, especialmente implementados en Japón indica que su desempeño cumple con las expectativas.

**3.2. Reactor de Agua a Presión Pasivo Avanzado (AP 1000, Advanced Passive Pressurized Water Reactor).** En este reactor de agua a presión desarrollado por Westinghouse en base al AP600 predomina la seguridad pasiva y usa sistemas simplificados en su diseño general. El AP 1000 mantiene la mayoría de las configuraciones de diseño del AP600 y usa algunos de sus componentes. También Incluye sistemas avanzados de seguridad pasiva y simplificaciones extensivas de la planta para mejorar la seguridad, construcción, operación y mantenimiento. Debido a las simplificaciones, este usa 50 % de válvulas, 86 % de tuberías, 87 % de cables, 36 % de bombas y 56 % de volumen de construcción sísmica menos que las plantas Westinghouse actuales. Por esta razón se reducen los costos y el tiempo de instalación, además de minimizar las actividades de mantenimiento. El AP 1000 está diseñado para usar técnicas modernas de construcción modular por lo que tareas de construcción que eran realizadas en secuencia tradicionalmente, se pueden hacer paralelamente. Este reactor está diseñado para lograr alta seguridad y desempeño, basado de forma conservadora en tecnología de reactores de agua a presión probada, pero haciendo énfasis en características de seguridad que recaen en fuerzas naturales como el flujo por gravedad, presión de gas, convección y flujo natural de circulación. Los sistemas de seguridad no utilizan componentes

activos por lo que no requieren sistemas de soporte con grado de seguridad y se reducen las acciones requeridas por parte del operador.

Su diseño considera el factor ambiental como prioridad e incorpora principios de reducción de la exposición a radiación para mantener la dosis de los trabajadores Tan Baja Como sea Razonablemente Posible (ALARA, As Low As Reasonable Achievable). Entre los sistemas pasivos de seguridad con los que cuenta están el sistema pasivo de enfriamiento del núcleo, el sistema pasivo de enfriamiento de la contención, el sistema de emergencia del cuarto de control y el aislamiento de la contención.

Por medio de niveles múltiples de defensa (defense-in-depth) enfocados en la mitigación de accidentes, se consigue una probabilidad de daño en el núcleo extremadamente baja. Para esto contribuyen seis aspectos del diseño: operación estable, fronteras de la planta física, sistemas pasivos relacionados con la seguridad, diversidad de los sistemas de seguridad, disponibilidad de sistemas de no-seguridad (cuya función es evitar la actuación innecesaria de los sistemas de seguridad) y contención del núcleo dañado.

El esquema de control de la planta está basado en el “seguimiento del reactor de las cargas de la planta”. El AP1000 está diseñado para el seguimiento de carga para hasta el 90 % del ciclo de combustible manteniendo constante la concentración crítica de boro, por lo que elimina la generación de agua residual.

**3.3. Reactor de Potencia Avanzado 1400 MWe (APR 1400, Advanced Power Reactor 1400 MWe).** El Reactor de Potencia Avanzado 1400 (APR 1400, Advanced Power Reactor 1400) es un diseño de reactor de agua a presión desarrollado en la República de Corea en base a la experiencia adquirida con el reactor de potencia óptimo (Optimum Power Reactor, OPR 1000). Debido a esto, la configuración básica de suministro de vapor nuclear es igual al de su predecesor.

Tiene muchas características avanzadas como la inyección directa a la vasija del sistema de inyección de seguridad<sup>4</sup>, dispositivo pasivo de regulación de flujo en el tanque de inyección de seguridad, sistema de suministro de agua de recarga de combustible dentro de la contención, sistema de despresurización avanzada y sistemas para control y mitigación de accidentes. Sus funciones de seguridad son de carácter híbrido, combinando sistemas activos y pasivos. El sistema de inyección de seguridad se compone de cuatro trenes mecánicos independientes.

Para el sistema de tuberías fue utilizado el principio de Leak-Before-Break (Fuga antes que ruptura). La aplicación de este reduce los soportes redundantes para tubería del sistema de suministro de vapor nuclear ya que los efectos dinámicos de rupturas pueden ser eliminados del diseño fundamental por lo que el costo de diseño, construcción y mantenimiento se reduce. El sistema de control químico y de volumen no desempeña un papel en las funciones de seguridad, es usado en la operación normal de la planta.

La operación se puede realizar de varios modos, tanto a plena potencia para carga base, como a carga parcial en seguimiento de carga (es decir, variando la potencia para cubrir la demanda existente en el momento). En su diseño se consideró para este último una variación en la potencia de 100 % a 50 % y nuevamente a 100 % de la potencia nominal todos los días.

---

<sup>4</sup>El sistema de inyección de seguridad se encarga de inyectar refrigerante en el reactor en caso de que se presente una pérdida de refrigerante.

Además, en caso de un *disparo* (trip) del generador<sup>5</sup> desde cualquier nivel de potencia, el APR 1400 previene el *disparo* del reactor (SCRAM)<sup>6</sup> y mantiene su potencia a un nivel reducido, lo que disminuye el tiempo necesario para regresar a la operación de potencia después de solucionar un problema y mejora la seguridad de la planta al evitar disparos innecesarios del reactor.

Debido a la gran importancia de la seguridad de la planta, su diseño sigue una política que busca mejorar la protección de la salud pública y la inversión de los propietarios, así además de aplicar los fundamentos de diseño de licenciamiento establecidos para cumplir con las reglas del licenciamiento, tiene un margen adicional de seguridad. Para cumplir con los objetivos de seguridad, el concepto de defensa-en-profundidad permanece como un principio fundamental. Se introduce la modularización en la construcción para reducir el periodo y el costo, usando tres tipos de módulos: Estructural, Equipamiento mecánico y Compuesto.

**3.4. Reactor Energético de Agua-Agua (VVER-1200 [V-491], Vodo-Vodyanoi Energetichesky Reaktor 1200).** El diseño de la planta Reactor Energético de Agua-Agua (VVER-1200, Vodo-Vodyanoi Energetichesky Reaktor 1200) con el reactor V-491 es un desarrollo evolutivo del VVER-1000 realizado por la organización de diseño general Atomenergoproekt (en San Petersburgo) y la Organización de diseño general de planta de reactor Gidropress, con la supervisión del instituto Kurchatov. Existe uno con un reactor V-392M desarrollado por la organización de diseño independiente Atomenergoproekt (en Moscú). Las diferencias entre ambas plantas son:

- Incorporación de un sistema pasivo de remoción de calor de la contención y sistema pasivo de remoción de calor por generadores de vapor en el reactor V-491.
- Incorporación de un sistema pasivo de inundación del núcleo en el reactor V-392M.
- Incorporación de sistemas activos para inyección de emergencia en alta y baja presión en el reactor V-491.
- Diferencias en los sistemas para lidiar con accidentes más allá de los postulados en el diseño fundamental.
- Diferencias en la predicción de frecuencia de daño al núcleo (V-491:  $5.97 \times 10^{-7}$ , V-392:  $6.1 \times 10^{-7}$ ).
- Diferencias en los sistemas de control e instrumentación, de agua de alimentación y disposición del panel de control.
- Diferencias en la disposición de la planta nuclear de potencia.

El diseño V-392M considera el uso de una gran cantidad de sistemas de seguridad pasivos comparado con el del V-491, basado principalmente en la aplicación de sistemas activos. A pesar de eso, el segundo tiene una frecuencia de daño al núcleo menor por lo que es el que se considera en esta descripción.

El diseño de la planta está basado en el principio de prioridad en la seguridad del personal, población y ambiente. Eso se logra por medio de la aplicación del principio de defensa-en-profundidad en la aplicación de un sistema de barreras contra la posible propagación de radiación ionizante y sustancias radiactivas en el ambiente, y de sistemas de seguridad de ingeniería junto a medidas organizacionales para garantizar la integridad de esas barreras.

<sup>5</sup>El *disparo* del generador es la desconexión del generador de la red eléctrica debido a la apertura de sus interruptores de salida.

<sup>6</sup>Un *disparo* del reactor es la parada brusca del reactor por la inserción de las barras de control.

La determinación de la configuración del sistema de seguridad se basa en la aplicación de los principios de redundancia, una sola falla, diversidad, separación física, protección contra errores de operador, y seguridad inherente en el reactor.

El diseño simple y confiable de los sistemas de seguridad se debe a la aplicación de sistemas activos, pasivos y equipo confiable. Cuenta con 7 sistemas de seguridad activos (sistemas de rociado de emergencia a alta y baja presión, remoción de gas de emergencia, inyección de boro de emergencia, agua de alimentación de emergencia, remoción del calor residual y aislamiento de la línea principal de vapor) y 4 pasivos (una parte pasiva en el sistema de refrigeración de emergencia del núcleo, remoción del calor de la contención, remoción de calor por medio de los generadores de vapor y doble contención con receptor de núcleo).

El uso del modelo PGV-1000MKP de generador de vapor, del tipo horizontal, hace posible reducir la altura de la construcción, lo que mejora la resistencia sísmica. Las bombas de refrigerante del reactor tiene además la función de proveer circulación de refrigerante en desaceleración bajo cualquier accidente de pérdida de potencia, que permite una transición suave al modo de circulación natural.

En el sistema principal de tuberías del refrigerante se utiliza el concepto de fuga antes que ruptura. La composición y estructura de los componentes principales, equipo y sistemas de la planta nuclear de potencia están basadas en soluciones usadas en diseños previos y mejorados de acuerdo a las demandas actuales.

**3.5. NuScale.** El diseño preliminar de este reactor surge en el 2003 bajo el nombre de Multi-Application Small Light Water Reactor (MASLWR), como resultado de un proyecto de la Universidad Estatal de Oregon en colaboración con el Laboratorio Nacional de Ingeniería de Idaho. En el 2007 se forma la empresa NuScale Power Inc. Con el fin de comercializar el concepto, cambiando el nombre al de NuScale Plant. El bloque fundamental de la planta NuScale es el módulo de potencia NuScale con un pequeño reactor nuclear de 160 MWt y con una potencia eléctrica neta de 45 MWe, alojado con otros componentes del sistema primario en una vasija de presión rodeada de un contenedor de acero, que es sumergido en una gran piscina de agua en la que se pueden colocar hasta 12 módulos. En el circuito primario se utiliza un sistema de circulación natural, mientras en el secundario el agua es bombeada.

Algunas de sus características distintivas son el tamaño compacto, enfriamiento por circulación natural que permite hasta 30 días de remoción de calor, el uso de tecnología reactores de agua ligera que podría permitir el licenciamiento con el marco regulatorio actual para LWR, modularidad y líneas de potencia dedicadas para cada módulo, además del uso de un contenedor modular móvil. El diseño incluye un conjunto comprensivo de características de ingeniería de seguridad para proveer un enfriamiento al núcleo estable durante un largo tiempo bajo todas las condiciones, así como para mitigación de accidentes severos. Estas incluyen alta presión de la contención, dos sistemas pasivos de remoción de calor de decaimiento y de la contención, y mitigación de accidentes severos. Debido a los sistemas de enfriamiento pasivos, el núcleo siempre se mantiene bajo el agua y el reactor puede ser enfriado con seguridad por un tiempo ilimitado sin un suministro de corriente (AC o DC), acción de un operador, ni agua adicional. La planta NuScale utiliza el principio de defensa-en-profundidad.

En el 2012 un cuarto de control de doce reactores simulado fue comisionado, se espera que el diseño obtenga la certificación para el año 2020 y comience su operación comercial en el 2023.

**3.6. Reactor Avanzado Modular de Sistema-integrado (SMART, System-integrated Modular Advanced Reactor).** El Reactor Avanzado Modular de Sistema-integrado (SMART, System-integrated Modular Advanced Reactor) es un reactor integral pequeño de agua a presión diseñado por el Instituto Coreano de Investigación en Energía Atómica (KAERI, Korean Atomic Energy Research Institute).

Incluye características de seguridad inherentes y tanto sistemas activos como pasivos (aunque se espera que sea modificado para el uso de solamente sistemas pasivos). Su diseño integral, en el que la vasija contiene los principales componentes del reactor como el presurizador, las bombas de recirculación, y los generadores de vapor, elimina la posibilidad de algún accidente de pérdida grande de refrigerante, permitiendo solamente pequeñas fugas de refrigerante. Utiliza el concepto de defensa-en-profundidad en todos sus niveles de seguridad, teniendo como fin la minimización de fallas y operación anormal, su detección y control, control de accidentes contemplados en el diseño, y control de accidentes severos. También sigue los principios de diversificación, redundancia e independencia para los sistemas relacionados con la seguridad. Además cuenta con un sistema de remoción de calor por circulación natural que evita el sobrecalentamiento incluso ante la ausencia de energía eléctrica.

El calor remanente en el vapor después de la producción de electricidad y el paso por los precalentadores, puede ser usado para procesos o desalinización de agua de mar.

**3.7. Central Argentina de Elementos Modulares (CAREM).** La Central Argentina de Elementos Modulares (CAREM) es un proyecto de la Comisión Nacional de Energía Atómica de Argentina y fue presentado en 1984, siendo uno de los primeros diseños de reactores de nueva generación. El propósito es el desarrollo, diseño y construcción de una planta nuclear de potencia pequeña, simple e innovadora. Algunas de las características de diseño de alto nivel son su sistema integrado de enfriamiento primario, un sistema primario autopresurizado, mecanismos de manejo de barras de control hidráulico dentro de la vasija y sistemas de seguridad basados en características pasivas. Para módulos de menos de 150MWe, el flujo de refrigerante primario se consigue mediante la circulación natural. Debido al enfoque de diseño integral, el presurizador y los generadores de vapor se encuentran dentro de la vasija del reactor. A causa de algunas de sus características, como el coeficiente de retroalimentación de reactividad negativo, el largo inventario de agua, y las de autopresurización, es posible mantener la presión del reactor en el punto de operación durante diferentes transitorios, incluso en el caso de rampas de potencia, con un movimiento mínimo de las barras de control. El concepto de defensa en profundidad ha sido internalizado en su diseño con el fin de mejorar significativamente la seguridad, en comparación con la de las plantas nucleares de potencia actuales. Sus sistemas de seguridad se basan en características pasivas por lo que no se requieren corriente alterna ni acciones de un operador para mitigar los eventos postulados durante el periodo de gracia (36 horas). Estos están duplicados para cumplir el criterio de redundancia y el sistema de apagado esta diversificado para cubrir los requisitos de regulación. El prototipo CAREM-25 tiene la finalidad de validar las innovaciones para la versión comercial. Fue desarrollado utilizando tecnología doméstica, con al menos 70 % de sus componentes y servicios relacionados de proveedores argentinos. En el 2014 se inició la construcción formal después de algunos trabajos de ingeniería civil y se espera que funcione a plena carga por primera vez en el 2018.

---

#### 4. Métodos Comparativos

La selección del uso de algún método de MCDA resulta paradójica ya que es un problema de toma de decisiones de múltiples criterios. Triantaphyllou (2000) presenta una evaluación de los métodos WPM, AHP y TOPSIS usando como criterios de evaluación su exactitud al reducirlos a una dimensión e indiferencia ante la sustitución de una alternativa que no es la mejor, concluyendo que el método que mejor satisface estos criterios de manera general es el AHP revisado (modificación del método AHP). Ishizaka y Nemery (2013) presentan un método que consiste en la consideración de los parámetros de entrada, determinando el esfuerzo del modelado, así como los resultados obtenidos por el método, y otro que consiste en definir los parámetros clave. Montis y col. (2005) recomienda el uso de Teoría de Utilidad de Múltiples Atributos (MAUT, Multiple Attribute Value Theory), del cual WSM es un caso particular, y AHP para aplicaciones en las que se requiere obtener información de la aplicación del método y conseguir un ranking de las alternativas.

Tomando como base los trabajos de Reyes Ramírez (2006), Barragán Martínez (2008) y Espinosa Sosa (2010) se utilizarán en esta tesis los métodos de WSM y WPM. Estos se seleccionaron tomando en cuenta la simplicidad para el WSM y la confiabilidad reportada por Barzilai y Golany (1994) del WPM con la que se evitan problemas de inversión del ranking<sup>7</sup>. Ambos modelos se pueden considerar casos especiales de la MAUT, en la que existen funciones de utilidad para cada criterio  $U_j(a_{i,j})$  y se busca maximizar una función de utilidad global que agrega los valores de todos los criterios por alternativa ( $V_i(U_j)$ ).

**4.1. Modelo de Suma Ponderada (WSM, Weighted Sum Model).** En este modelo se usa una función de utilidad global lineal,

$$V_i = \sum_{j=1}^n w_j a_{ij}.$$

Esta es una media aritmética ponderada de los valores de los criterios de cada alternativa. La mejor alternativa es aquella cuyo resultado es mayor,

$$A^* = A_s | V_s = \max_{i=1,2,\dots,n} V_i.$$

Se usaron dos funciones de utilidad para los criterios, una para aquellos que se busca maximizar,

$$U(a_{i,j})_j = \frac{a_{i,j}}{\max_{k=1,2,\dots,m} a_{k,j}},$$

y otra para los que se busca minimizar,

$$U(a_{i,j})_j = \frac{\frac{1}{a_{i,j}}}{\max_{k=1,2,\dots,m} \frac{1}{a_{k,j}}}.$$

---

<sup>7</sup>Barzilai y Golany (1994) demuestran matemáticamente que no importa el tipo de normalización, la agregación por medio de la suma ponderada lleva a inconsistencias que se evitan al usar una media geométrica ponderada, como en el WPM.

Estas funciones son la normalización por fracción del máximo, que es el tipo de normalización que recomienda Triantaphyllou (2000)<sup>8</sup> para reducir los problemas de inconsistencia.

**4.2. Modelo del Producto Ponderado (WPM, Weighted Product Model).** Es un modelo es similar al WSM pero usando como función de utilidad global la media geométrica

$$V_i = \prod_{j=1}^n (a_{i,j})^{w_j}.$$

Debido a las propiedades de los logaritmos, esto es equivalente a usar el WSM pero con funciones de utilidad logarítmicas para los criterios

$$V_i = b^{\log_b(\prod_{j=1}^n (a_{i,j})^{w_j})} = b^{\sum_{j=1}^n w_j \log_b(a_{i,j})}.$$

Debido a que resulta más práctica su aplicación en la versión logarítmica, se optó por utilizar esta, por lo que las funciones de utilidad de los criterios son

$$U(a_{i,j})_j = \log_b(a_{i,j})$$

para maximizar y

$$U(a_{i,j})_j = \log_b\left(\frac{1}{a_{i,j}}\right)$$

para minimizar.

Para este modelo, finalmente se usan los resultados de las sumas como exponentes de la base  $b$  para obtener el valor final.

**4.3. Jerarquías en los criterios.** Ya que se determinaron los criterios de manera jerárquica, se realizaron los cálculos de los pesos globales utilizando la propiedad distributiva de la multiplicación. Se multiplican entonces el peso de cada subcriterio por el peso del criterio al que pertenecen (tecnológico o no-tecnológico). Esto es, considerando los pesos  $w$  para los  $l$ -criterios, y los pesos  $u$  para los subcriterios,

$$V_i = \sum_{k=1}^l w_{k(j)} \sum_{j=1}^n u_j U_j = \sum_{j=1}^n w_{k(j)} u_j U_j$$

donde  $k(j)$  es el número de criterio, que depende de la clasificación del criterio  $j$ . Siendo entonces  $w_{k(j)} u_j$  el nuevo peso para el criterio.

**4.4. Implementación.** Para aplicar estos métodos, se hicieron 3 scripts de python, uno para leer los datos de un archivo de texto y uno para cada método con el procedimiento, imprimiendo los resultados. Las características seleccionadas para los métodos utilizados son consistentes con las incluidas en el paquete Scikit-Criteria de Python (Cabral, Luczywo, y Zanazzi, 2016).

---

<sup>8</sup>La normalización es utilizada en el método AHP revisado, pero debido a que la parte que analiza, que es la agregación de los datos, es idéntica al uso del método de WSM con normalización, la recomendación sirve para este último también.

## Selección del Sitio

En el 3 se realizó una comparativa entre diferentes diseños de reactores nucleares disponibles en el mercado por medio de métodos de MCDA, elaborando rankings basados en el valor de utilidad obtenido bajo diferentes condiciones. En este capítulo se realizará un análisis de la península de Yucatán con el fin de proponer posibles sitios para la instalación de centrales nucleares.

### 1. Lineamientos Para la Selección de Sitio

Gürpınar (2010) indica que las actividades relacionadas con la selección del sitio para las instalaciones nucleares se pueden dividir en las siguientes 5 etapas:

1. Sondeo: Identificación de posibles regiones, posibles sitios y sitios candidatos.
2. Selección: Evaluación de los sitios candidatos para la selección uno de ellos, esperando que sea el definitivo.
3. Valoración: Confirmación de aceptabilidad y caracterización del sitio seleccionado.
4. Pre-Operacional: Trabajos de confirmación y monitorización.
5. Operacional: Confirmación, monitorización y evaluación periódica.

Esta tesis se limita a la etapa de sondeo, en la que se llevan a cabo estudios e investigaciones a nivel regional para identificar sitios potenciales (IAEA, 2015). Al final, a través de un análisis cualitativo se proponen algunos sitios para construir los reactores elegidos.

En la Figura 4.1 se muestra el diagrama de flujo para la selección del sitio. Este diagrama se basa en las publicaciones de seguridad de la IAEA, que pueden ordenarse jerárquicamente como Fundamentos, Requerimientos y Guías. En el caso de la selección de sitio se trata de los siguientes<sup>1</sup>:

**Fundamentos:** Fundamental Safety Principles (SF-1).

**Requerimientos:** Site Evaluation for Nuclear Installations (NS-R-3).

**Guías:** External Human Induced Events in Site Evaluation for Nuclear Power Plants (NS-G-3.1), Dispersion of Radioactive Material in Air and Water and Consideration of Population Distribution in Site Evaluation for Nuclear Power Plants (NS-G-3.2), Geotechnical Aspects of Site Evaluation and Foundations for Nuclear Power Plants (NS-G-3.6), Meteorological and Hydrological Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installations (SSG-18), Volcanic Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installations (SSG-21), Site Survey and Site Selection for Nuclear Installations (SSG-35) y Seismic Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installations (SSG-9).

---

<sup>1</sup>La lista de documentos ha sido actualizada ya que algunos de los documentos presentados por Gürpınar (2010) son obsoletos.

Es importante notar que estos documentos consideran solamente la reducción de los riesgos radiológicos, aunque en este trabajo se toman en cuenta algunos aspectos no-radiológicos y no relacionados con la seguridad.

En el SF-1 (IAEA, 2006) se plantean los objetivos y principios de seguridad que deben seguir las instalaciones nucleares. Indica que la prioridad es la seguridad de las personas y el ambiente.

El NS-R-3 (IAEA, 2016b) establece los requerimientos que debe cumplir un sitio para asegurar la protección a la población y el ambiente; en el caso de los que no se cumplan se deben tomar medidas adecuadas. Estos requerimientos no aplican para la etapa de selección del sitio sino a las posteriores en el proceso de evaluación. Además de la prevención de accidentes, toma en cuenta la implementación de planes de emergencia en caso de que se presenten. En el párrafo 2.13 indica que se debe determinar la capacidad a instalar en las centrales nucleoelectricas lo más pronto posible durante la selección de sitio, y si se incrementa significativamente se debe reevaluar el sitio. El párrafo 2.17 señala que se debe obtener información histórica de los fenómenos naturales importantes o situaciones inducidas por humanos en la región para ser analizada cuidadosamente.

Para la evaluación del sitio se consideran terremotos, posibilidad de fallas superficiales, eventos meteorológicos (relámpagos, tornados y huracanes), inundaciones (por precipitaciones, tsunamis y falla en sistemas de control de agua), peligros geotécnicos (inestabilidad del declive, colapsos, hundimientos, levantamientos, licuefacción y resistencia del suelo) y eventos inducidos por humanos (impacto de aviones, explosiones químicas e instalaciones cercanas), entre otros.

El sitio debe ser caracterizado para evaluar los efectos potenciales en la región. Para esto se hace un análisis de las dispersiones atmosférica, subterránea y acuática de material radiactivo, usando datos meteorológicos, hidrogeológicos e hidrológicos. También se toma en cuenta la distribución presente y proyectada a futuro de la población, los usos de suelo y agua, y la radiactividad en la región previa a la construcción de instalaciones nucleares.

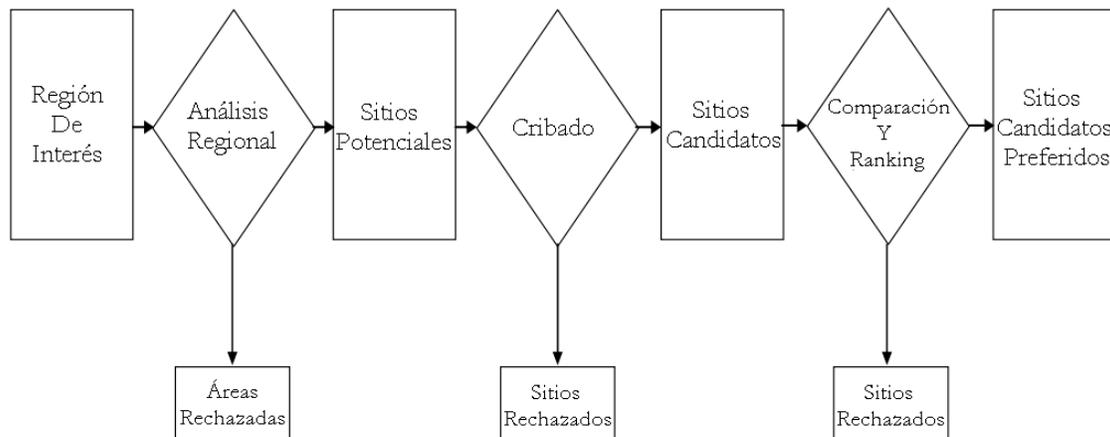


FIGURA 4.1. Diagrama de flujo para la selección de sitio de una instalación nuclear (Gürpınar, 2010)

## *Selección del Sitio*

---

Los riesgos en las instalaciones nucleares deben ser monitoreados a lo largo del ciclo de vida y actualizados periódicamente y cuando exista la posibilidad de cambios en los mismos. Todas estas actividades se deben llevar a cabo bajo un programa de control de calidad

El SSG-35 (IAEA, 2015) contiene recomendaciones para cumplir con los requisitos de seguridad para el proceso de selección de sitio establecidos en el NS-R-3 y los principios de seguridad planteados en SF-1. Este documento expresa que para evaluar si un sitio es adecuado para una instalación nuclear se deben tomar en cuenta

1. Los efectos de eventos externos que ocurren en la región del sitio específico (estos eventos pueden ser de origen natural o causados por humanos);
2. Las características del sitio y su entorno que puedan influenciar la transferencia de material radiactivo que ha sido liberado hacia las personas o el ambiente;
3. La densidad de población y distribución poblacional y otras características de la zona externa en tanto que estas pueda afectar la posibilidad de implementar medidas de emergencia y la necesidad de evaluar los riesgos de individuos y la población.

El SSG-35 también señala que la selección de sitio de una instalación nuclear consta de las primeras dos etapas de las actividades relacionadas con el sitio: sondeo y selección. En la etapa de sondeo se consideran grandes regiones en búsqueda de sitios potenciales que son evaluados posteriormente en la etapa de selección, rechazando aquellos que no sean adecuados, cribando y comparando los restantes para obtener los sitios candidatos preferidos. Los pasos que presenta para el sondeo y selección de sitio son: Análisis regional, para encontrar sitios potenciales; Criba, para seleccionar los sitios candidatos; y Evaluación, comparación y ranking, para identificar los más atractivos.

Durante el análisis regional se suelen tomar en cuenta criterios relacionados con las leyes y normas locales, económicas y ambientales, junto con aspectos técnicos como disponibilidad de recursos (como infraestructura, agua, etc.). Para la etapa de criba se consideran criterios de exclusión (eliminando los sitios en los que se presentan asuntos que no pueden ser solucionados a través de la ingeniería de forma práctica), y discrecionales (asociados con asuntos que tienen soluciones de ingeniería) que son útiles para ir eliminando los sitios menos favorables.

El SSG-35 reconoce que además existen otros factores importantes en la selección de sitio como consideraciones de salvaguardia, tecnología, economía, planeación del uso de suelo, disponibilidad de agua, impacto ambiental no-radiológico, impacto socioeconómico y opinión de las partes interesadas.

Tomando en cuenta la información de los documentos presentados previamente, en esta tesis se hace un breve análisis regional para identificar algunos sitios potenciales y proponer posibles sitios, complementando la selección del diseño. Se discuten los siguientes aspectos:

- Potencial de Inundación
- Infraestructura carretera
- Infraestructura eléctrica
- Disponibilidad de agua
- Densidad y distribución poblacional
- Áreas naturales protegidas
- Tráfico aéreo

- Riesgos industriales
- Huracanes
- Aspectos Económicos

En esta tesis no se toma en cuenta la actividad sísmica ya que es muy baja en la región y sería tomado en cuenta en las etapas posteriores de selección de sitio, además de que es posible adecuar el diseño del reactor a las condiciones locales.

## 2. Potencial de Inundación

La Figura 4.2 muestra las zonas de inundación de la península de Yucatán.

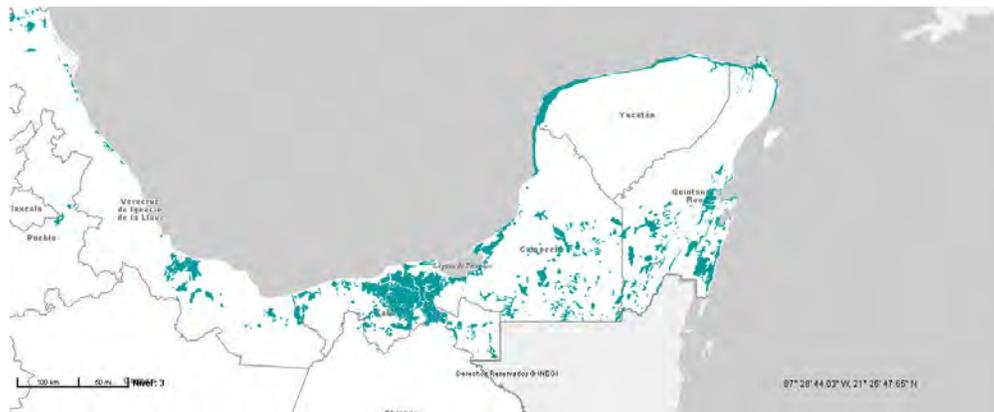


FIGURA 4.2. Zonas de inundación en la península de Yucatán (INEGI, 2010b)

Se puede observar que la costa de la península en general es propensa a inundaciones pero una porción importante del territorio no tiene este problema. El sur de Quintana Roo cuenta con algunas zonas que no se ven afectadas por inundaciones, incluyendo una porción de la costa de la bahía de Chetumal.

Se descartan las zonas de inundación, teniendo prioridad la parte de la península que tiene un área amplia sin potencial de inundación.

## 3. Infraestructura Carretera

La Figura 4.3 muestra las carreteras y caminos en la península de Yucatán.

La propuesta de esta tesis toma en cuenta la necesidad de este tipo de infraestructura para una central nucleoléctrica, por lo que solamente se contemplan zonas que se encuentren cerca de alguna carretera principal. Aunque al norte de la península existe una mejor comunicación por carretera, existen vías en toda la región.

## 4. Tráfico Aéreo

En el mapa de la Figura 4.3 se pueden ver también los aeropuertos de la península de Yucatán. Los principales se encuentran en las ciudades de Cancún, Mérida, Cozumel, Chetumal y Ciudad del Carmen. Las actividades turísticas al norte de Quintana Roo propician un tráfico aéreo elevado. Las actividades económicas y el tamaño de la ciudad de Mérida, también implica mayor tráfico aéreo comparado con el sur de la península.

Para la elección del sitio se prefieren las zonas con menor tráfico aéreo.

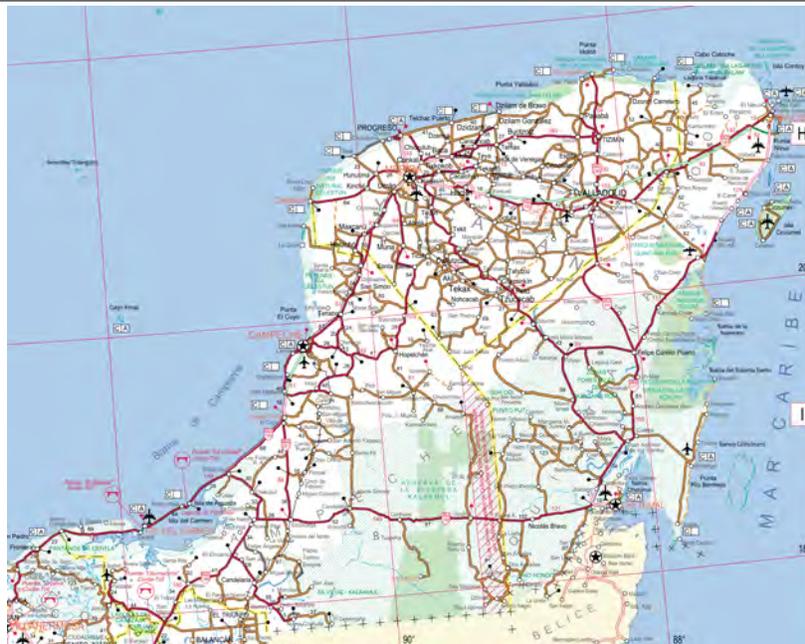


FIGURA 4.3. Red Nacional de Caminos en la península de Yucatán (SCT, 2017)

### 5. Infraestructura Eléctrica

La Figura 4.4 muestra la capacidad en MW de los enlaces entre las diferentes regiones de transmisión<sup>2</sup>.

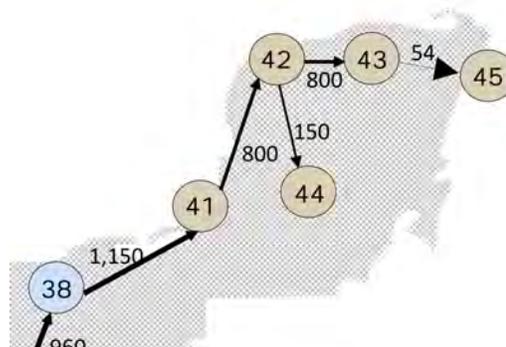


FIGURA 4.4. Capacidad de los enlaces de transmisión en la península de Yucatán entre las regiones de transmisión 41 (Lerma), 42 (Mérida), 43 (Cancún), 44 (Chetumal) y 45 (Cozumel) (SENER, 2016a). Para la transmisión, se utiliza una división de las regiones distinta a la usada para generación.

La interconexión de la península con el resto del país se hace entre las regiones 41 (Lerma) y 38 (Tabasco). Además existe una interconexión de 100 MW con Belice a través de la región

<sup>2</sup>Para la transmisión, los documentos de planeación dividen el país en 53 regiones.

44 (Chetumal). Se observa que la energía eléctrica que proviene del resto del país se dirige hacia la región 42 (Mérida) desde donde se envía hacia la 44 (Chetumal) y 43 (Cancún). Esta última está interconectada con la región 45 (Cozumel).

Los proyectos planeados para el incremento en la capacidad de transmisión según la SENER (2016b) implican los siguientes incrementos entre las regiones: 2,116 MW entre Lerma y Chetumal; 1,684 MW entre Lerma y Mérida; 1,743 MW entre Mérida y Cancún; Y 1,364 MW entre Mérida y Chetumal. Tomando en cuenta esto se puede considerar que la infraestructura es adecuada y es posible hacer cambios en los proyectos de incremento para que se ajusten al sitio elegido para cualquier central propuesta en esta tesis.

## 6. Disponibilidad de Agua

En la Figura 4.5 se puede ver el mapa de la península de Yucatán. En este se puede observar la costa. Utilizando la versión en línea del mapa es posible identificar cuerpos y corrientes de agua más pequeños.



FIGURA 4.5. Mapa de la península de Yucatán (Google, 2018)

La península de Yucatán cuenta con costa y cuerpos de agua que podrían proveer una central nucleolétrica de agua para enfriamiento.

## 7. Densidad y Distribución Poblacional

La densidad de población de los estados de Campeche, Quintana Roo y Yucatán según datos de 2015 es de 16, 34 y 53 personas por kilómetro cuadrado respectivamente. En la Figura 4.6 se pueden ver las principales poblaciones del país y su densidad de población.

Se observa que la parte con mayor densidad de población y cantidad de poblaciones importantes es el estado de Yucatán, seguido de Quintana Roo y por último Campeche. Se prefieren los sitios con menor densidad de población y número de poblaciones.



FIGURA 4.6. Mapa de la México con la densidad de población de las principales poblaciones (Population Labs, 2011)

## 8. Áreas Naturales Protegidas

En la Figura 4.7 se muestran las áreas naturales protegidas de la península de Yucatán.

Se descartan las áreas protegidas clasificadas como *reserva de la biósfera*, *parque nacional* y *santuario*, y se prefiere evitar aquellas denominadas *área de protección de flora y fauna*.

## 9. Riesgos Industriales

En la Figura 4.8 se observa un mapa con los principales parques industriales de la península de Yucatán. Son más recomendables los sitios alejados de los parques industriales.

## 10. Aspectos Económicos

La economía de la península de Yucatán tiene como principales actores de desarrollo las actividades petroleras en Campeche, el turismo al norte de Quintana Roo y algunas ramas industriales y agroindustriales en el estado de Yucatán (Baños Ramírez y Castañeda Navarrete, 2007a). El sur de Quintana Roo no tiene una actividad económica importante, subsistiendo principalmente del sector gubernamental en la ciudad de Chetumal (capital del estado) y prestación de servicios. También en las zonas de Campeche alejadas de la capital y Ciudad del Carmen, el desarrollo económico es más lento.

Actualmente el estado de Yucatán satisface una parte de las necesidades agrícolas e industriales de los centros turísticos en la península de Yucatán (Baños Ramírez y Castañeda Navarrete, 2007b). Una opción para activar la economía al sur de Quintana Roo es por medio de la industria, para la manufactura de productos necesarios para las actividades económicas de otras zonas de la región. Si se pretende impulsar la economía del sur de Quintana Roo será

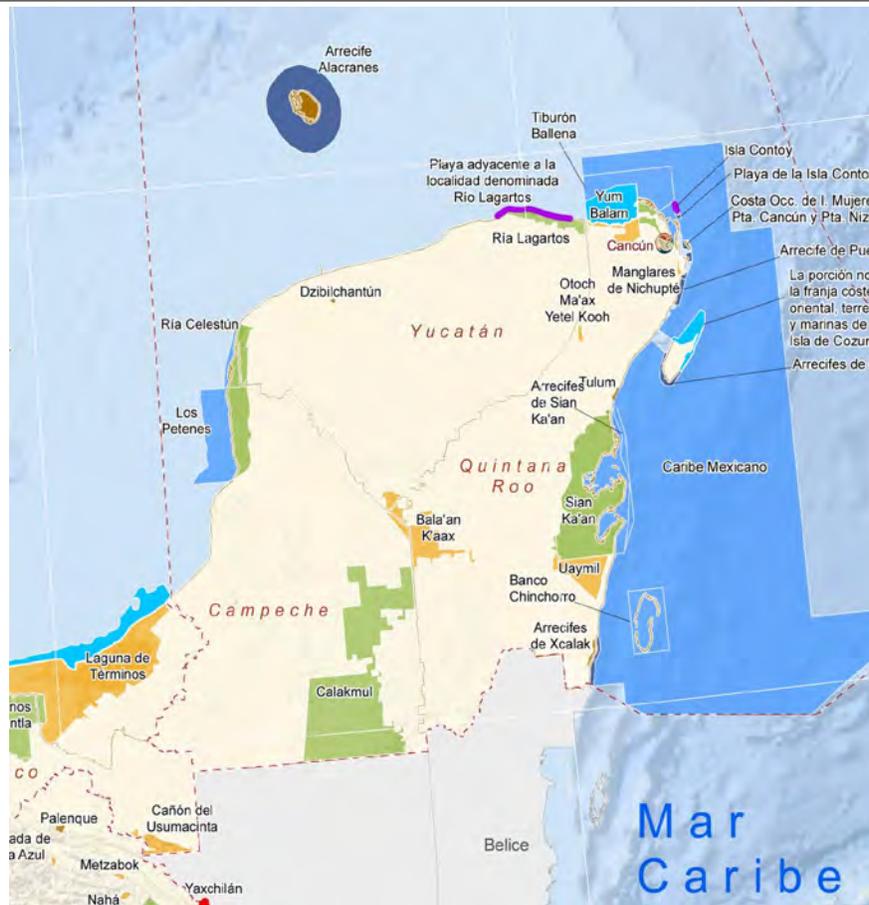


FIGURA 4.7. Áreas Naturales Protegidas en la península de Yucatán (CONANP, 2018)

necesario contar con un mayor suministro de energía debido al incremento a la demanda, especialmente si es a través del crecimiento industrial. La construcción de centrales eléctricas en esta zona, además de brindar energía a la región, podría permitir y propiciar el crecimiento económico local.

## 11. Huracanes

La Figura 4.9 muestra las trayectorias de los ciclones tropicales entre 1851 y 2017.

Tres zonas resultan de especial interés, el centro de la península que presenta una baja incidencia en las trayectorias de los huracanes, la costa del Campeche en la que hay pocas trayectorias de huracanes de categoría 3 o mayor y el sur de Quintana Roo que tiene menor incidencia que el norte de la península además de contar con la bahía de Chetumal, que representa una zona con agua disponible pero protegida al impacto directo de huracanes.

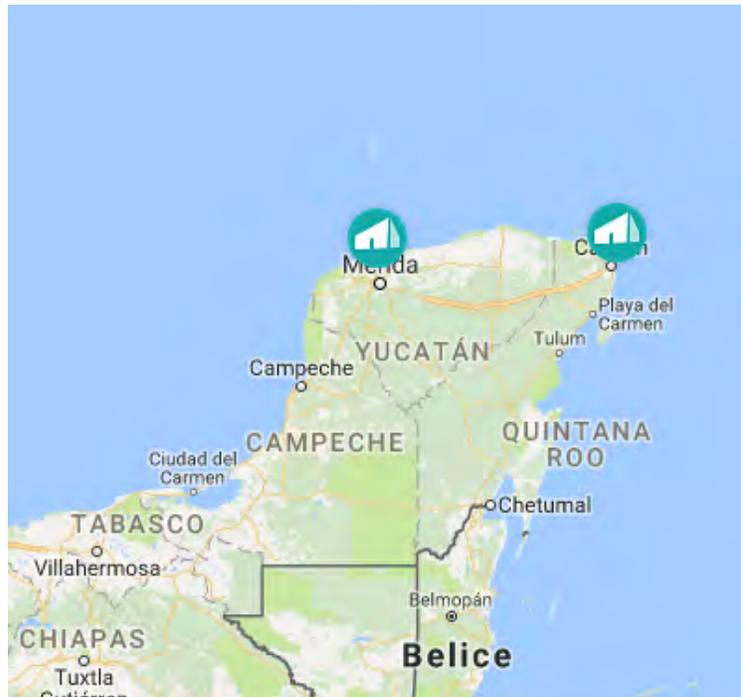


FIGURA 4.8. Principales parques industriales en la península de Yucatán (AMPIP, 2018)

## 12. Método de Selección

Para la propuesta de los sitios donde podría construirse una central nucleolétrica se hará un análisis cualitativo con la información que se ha recopilado en este capítulo, identificando primero algunos que sean los más adecuados para posteriormente elegir los que sean necesarios para la propuesta.

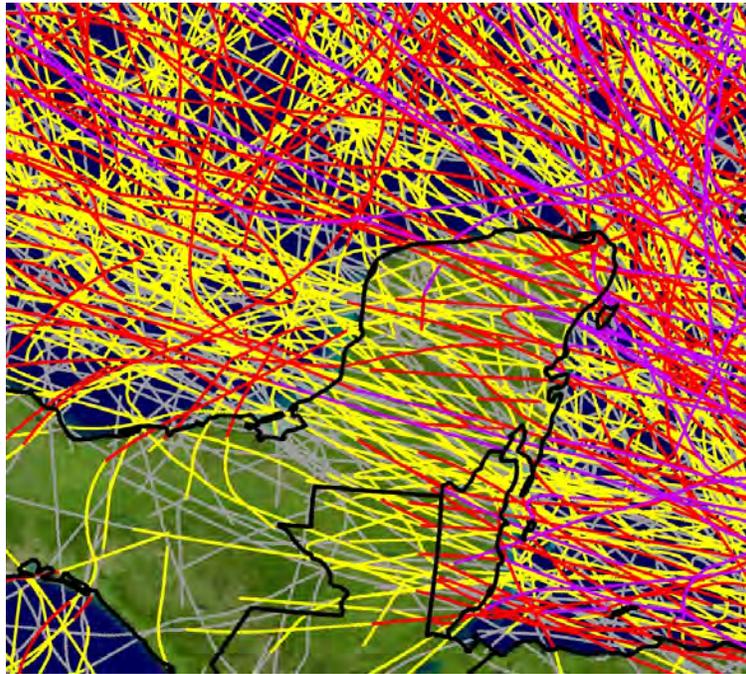


FIGURA 4.9. Trayectorias de los ciclones tropicales en la península de Yucatán de 1851 a 2017 (Gibney, 2018). Las líneas grises muestran depresiones, las líneas amarillas muestran las trayectorias de tormentas tropicales y subtropicales, las líneas rojas corresponden a los huracanes catalogados debajo de categoría 3 y las líneas moradas describen las de los huracanes de categoría 3 o mayor.

## Discusión, Propuesta y Conclusiones

En el Capítulo 4 se presentaron algunos aspectos a considerar para la selección del sitio para la construcción de centrales nucleares. En este capítulo se discute la información presentada en los capítulos anteriores y los resultados obtenidos, se hace una propuesta para la sustitución de proyectos de incremento de capacidad con centrales eléctricas que utilizan hidrocarburos por el uso de energía nuclear, y finalmente se exponen las conclusiones a las que se ha llegado en esta tesis.

### 1. Discusión y Resultados

Con base en la información presentada se puede ver que económicamente la energía nuclear es competitiva y puede ser la opción más barata con tasas de descuento bajas e incentivos para las energías limpias como impuestos por emisiones o bonos de carbono. La principal dificultad es su alto costo inversión, aunque existen diferentes métodos de financiamiento que pueden ser aplicados. Además, su alto factor de capacidad en contraste con los bajos factores de capacidad de las principales fuentes renovables de energía y sus bajas emisiones de GEI, del mismo orden de las de la energía eólica, hacen de la energía nuclear un complemento a las energías renovables, en lugar de competir con ellas, en la mitigación del cambio climático. Así, la energía nuclear puede ser utilizada en lugar de hidrocarburos para ayudar a satisfacer la carga base. Por lo tanto, en este trabajo se plantea la sustitución parcial de las centrales basadas en hidrocarburos planeadas, que representan un total de 1,959 MW de capacidad. No se plantea la sustitución total de estas ya que, si se pretende mejorar la seguridad energética, es necesaria la diversificación de las fuentes de energía. Asimismo se puede ver en la Tabla A.1 que algunos proyectos ya tienen fecha de inicio de operación establecida y en todos los casos es antes de 2020, por lo que no sería posible su sustitución. También se descartan los proyectos con capacidades menores a 15 MW debido que suman 30 MW, cantidad que no es comparable con la capacidad total que se planea agregar.

Aunque se espera un incremento en el índice de balance a nivel regional, la mayoría de los proyectos se llevarán a cabo en el estado de Yucatán, por lo que Quintana Roo y Campeche no presentan un incremento considerable de generación de electricidad quedando como importadores de energía. Aunque esto no representa un problema respecto a la autosuficiencia energética a esta escala, un esquema de generación más distribuido resultaría más conveniente al reducir la distancia de las centrales a algunos sitios de consumo y establecer una separación espacial que no permita que afecte a todas las centrales un mismo evento que afecte un área grande, como el paso de un huracán. Esto se toma en cuenta en esta tesis para la elaboración de la propuesta, con lo que se considera a los estados de Quintana Roo y Campeche como mejores candidatos.

Considerando la sustitución de dos proyectos de cogeneración eficiente de gas natural (CCE GCO 12 y 13), con capacidad de 542 MW (527.4 MW firmes) cada uno, el índice

Shannon basado en la fuente primaria de energía sería de 1.45 y la equidad de 0.81. Esto representa una mejora sustancial respecto a las propuestas actuales. Además aumentaría la participación de energías limpias a un 52 % que se acerca más al 60 % que tendría según el PIIRCE(SENER, 2016b) considerando al definición de la LTE (H. Congreso de la Unión de los Estados Unidos Mexicanos, 2015) de energías limpias, y por lo tanto se podría conseguir una generación con energías limpias más cercana a la presentada en los documentos de planeación. Sustituyendo además dos proyectos de cogeneración eficiente con diesel (CCE GCO 35 y 36) de 169.4 MW (167.5 MW firmes) cada uno, se puede aumentar aún más la participación de energías limpias. Sin embargo se obtendría un índice Shannon de 1.29 y una equidad de 0.72, lo que significa que existiría una mayor dependencia del uranio. Aunque esto afectaría negativamente a la diversidad de fuentes de energía, se debe considerar que hay una alta disponibilidad de uranio y su costo es estable, por lo que el impacto en la seguridad energética puede resultar positivo.

México cuenta ya con una central nucleoelectrónica de dos reactores y existen planes para la instalación de nuevos reactores nucleares y con instituciones encargadas aprovechamiento, desarrollo y supervisión de las actividades nucleares como la CFE, el ININ y la CNSNS. También se mostró que hay un marco legislativo que regula del aprovechamiento de la energía nuclear y los minerales radiactivos, además de estar contemplado en los documentos de planeación del sector eléctrico. Por tanto, proponer la construcción de nuevas centrales nucleares en México tiene sustento y es viable. Más aún, las leyes, directrices, criterios, acuerdos y políticas públicas en materia de energía y medio ambiente propician el uso de energía nuclear al promover la seguridad energética (que incluye la diversificación de fuentes de energía) y sustentabilidad, objetivos que hasta ahora no se ha podido demostrar que sean alcanzables sin su participación.

Aunque los documentos que dirigen el desarrollo del sector eléctrico consideran la cogeneración eficiente como una energía limpia, en esta tesis se expuso que incluso reduciendo las emisiones de una planta de ciclo combinado a una quinta parte, aunque se espera que realmente sea a la mitad, las emisiones por el ciclo de vida resultan por lo menos 3 veces mayores que las de las fuentes renovables y la energía nuclear. Si de verdad se espera reducir las emisiones de GEI para disminuir los efectos del cambio climático, es necesario reconsiderar la inclusión de la cogeneración eficiente en las energías limpias ya que esto puede retrasar el aprovechamiento de fuentes más efectivas para cumplir con este objetivo, como la nuclear.

En el Capítulo 3 se realizó una comparación de 7 diseños de reactores por medio de MCDA, utilizando los métodos WSM y WPM. La ponderación de los criterios se hizo de forma directa y usando una metodología tipo AHP tal como se describe en el Capítulo 3. Además se realizó 3 veces, primero comparando solamente los reactores avanzados, luego solamente los SMRs y finalmente todos los reactores presentados en esta tesis. En las Tablas 5.1 a 5.6 se presentan los resultados. Estos incluyen la calificación del reactor obtenida por el método de evaluación y el valor de la misma normalizado como fracción del máximo como porcentaje. Además los diseños están ordenados según su calificación de mayor a menor.

Las Tablas 5.1 y 5.2 muestra los resultados para los reactores avanzados con las metodologías WSM y WPM respectivamente. Del mismo modo las Tablas 5.3 y 5.4 presentan la comparativa usando ambas metodologías y las Tablas 5.5 y 5.6 lo hacen con los resultados obtenidos al analizar todos los reactores.

*Discusión, Propuesta y Conclusiones*

(A) Asignación directa de pesos			(B) Metodología AHP		
Reactor	Puntuación		Reactor	Puntuación	
	Total	Normalizada		Total	Normalizada
APR 1400	87.93	100.0	APR 1400	91.63	100.0
ABWR	86.79	98.70	ABWR	86.04	93.90
AP 1000	77.42	88.04	AP 1000	76.20	83.16
VVER 1200	73.46	83.54	VVER 1200	71.55	78.09

TABLA 5.1. Resultados del WSM para los Reactores Avanzados

(A) Asignación directa de pesos			(B) Metodología AHP		
Reactor	Puntuación		Reactor	Puntuación	
	Total	Normalizada		Total	Normalizada
APR 1400	372.4	100.0	APR 1400	320.7	100.0
ABWR	370.6	99.54	ABWR	302.2	94.24
AP 1000	326.3	87.62	AP 1000	263.4	82.13
VVER 1200	307.9	82.69	VVER 1200	246.2	84.90

TABLA 5.2. Resultados del WPM para los Reactores Avanzados

(A) Asignación directa de pesos			(B) Metodología AHP		
Reactor	Puntuación		Reactor	Puntuación	
	Total	Normalizada		Total	Normalizada
NuScale	86.13	100.0	NuScale	83.40	100.0
SMART	79.75	92.59	SMART	76.60	91.84
CAREM	67.44	78.29	CAREM	61.84	74.15

TABLA 5.3. Resultados del WSM para SMRs

(A) Asignación directa de pesos			(B) Metodología AHP		
Reactor	Puntuación		Reactor	Puntuación	
	Total	Normalizada		Total	Normalizada
NuScale	487.5	100.0	NuScale	385.2	100.0
SMART	388.1	79.61	SMART	299.1	77.65
CAREM	346.6	71.09	CAREM	264.8	68.75

TABLA 5.4. Resultados del WPM para SMRs

Se puede notar que las diferencias entre los dos tipos de ponderación no son muy grandes, como se podría esperar al considerar la similitud entre ambas ponderaciones como se ve en la Figura 3.1. Comparando los resultados de los dos métodos para los mismos diseños y

(A) Asignación directa de pesos			(B) Metodología AHP		
Reactor	Puntuación		Reactor	Puntuación	
	Total	Normalizada		Total	Normalizada
ABWR	70.65	100.0	APR 1400	71.84	100.0
APR 1400	69.22	97.98	ABWR	69.61	96.89
SMART	66.82	94.57	SMART	67.40	93.82
NuScale	66.81	94.56	NuScale	65.03	90.52
VVER 1200	59.51	84.22	AP 1000	58.18	80.98
AP 1000	58.93	83.41	VVER 1200	57.76	80.41
CAREM	52.09	73.72	CAREM	48.74	67.84

TABLA 5.5. Resultados del WSM para todos los reactores

(A) Asignación directa de pesos			(B) Metodología AHP		
Reactor	Puntuación		Reactor	Puntuación	
	Total	Normalizada		Total	Normalizada
NuScale	487.5	100.0	NuScale	385.2	100.0
SMART	388.1	79.61	APR 1400	320.7	83.25
APR 1400	372.4	76.38	ABWR	302.2	78.46
ABWR	370.6	76.03	SMART	299.1	77.65
CAREM	346.6	71.09	CAREM	264.8	68.75
AP 1000	326.3	66.93	AP 1000	263.4	68.38
VVER 1200	307.9	63.16	VVER 1200	246.2	63.91

TABLA 5.6. Resultados del WPM para todos los reactores

ponderación se observa que solamente en las Tablas 5.5 y 5.6 se presenta una variación en las posiciones del ranking.

Al comparar los resultados de los reactores avanzados y SMRs por separado con los de todos los reactores, para el mismo método y los mismos criterios, se puede ver que en el caso del WSM se obtienen calificaciones diferentes y se presentan cambios en el orden del ranking. En las Tablas 5.0a y 5.4a hay permutas en las posiciones de los reactores APR 1400 y ABWR, y AP 1000 y VVER-1200. En el primer caso la diferencia entre el resultado de ambos diseños es de solamente 1.30 % por lo que no es una variación relevante, pero para el segundo la diferencia es de 4.5 %. La diferencia es más grande aún para los reactores SMART y NuScale entre las Tablas 5.2a y 5.4a, con 7.41 % de diferencia entre ellos, y las Tablas 5.2b y 5.4b, con 8.16 %. Estos resultados reflejan la falta de consistencia mencionada anteriormente para el WSM, mostrando que la inclusión de nuevas alternativas pueden llevar a cambios en el ranking. Por lo tanto para la propuesta se descarta el uso de los resultados de este método.

Para el caso del WPM las calificaciones obtenidas son las mismas sin importar el número de alternativas, por lo que el orden del ranking se mantiene con respecto al tipo de reactor, cambiando solamente el resultado respecto a la mejor alternativa. Al comparar los resultados

## *Discusión, Propuesta y Conclusiones*

de las Tablas 5.5a y 5.5b se observa que son muy similares, variando solamente en la posición del SMART que se encuentra dos posiciones arriba en la primera.

Ya que la asignación de pesos con metodología tipo AHP resulta más sistemática y sencilla al basarse en la comparación por pares, para la propuesta de esta tesis se utilizarán los resultados de la tabla 5.5b. En esta tabla, el diseño NuScale ocupa el primer lugar en el ranking, seguido por el APR 1400 y el ABWR. Se puede notar que la diferencia entre el primer y el segundo diseño es de 16.25 % pero la diferencia entre el segundo y el tercero es de 5.77 % (4.79 % respecto al NuScale). Por lo tanto, al tomar en cuenta que la incertidumbre en los datos y la diferencia entre la segunda y tercera posición del ranking se puede considerar que ambas son prácticamente igual de adecuadas. Esto también se puede apoyar en la diferencia de solamente 0.46 % entre los resultados de estos reactores en la Tabla 5.1a.

El diseño NuScale es innovador y todavía no hay experiencia en este tipo de reactores modulares por lo que seleccionarlo representaría un reto para México, a la vez que podría posicionar al país como uno de los pioneros en el uso de esta tecnología, impulsando la cooperación con otros países y la educación e investigación en el área. Además ya se mencionaron algunas de las ventajas de los SMRs, entre las que se encuentran el menor costo de inversión y la flexibilidad en los incrementos de potencia. Por otro lado, los reactores APR 1400 y ABWR representan una opción segura y probada. Además, por la potencia requerida en los nuevos proyectos nucleares en México, se puede inferir que se trata de reactores ABWR, por lo que representa una ventaja para este diseño.

Considerando todos los factores relativos a la selección de sitio para centrales nucleares, se identifican 3 zonas de interés. En la parte central de la península se cumple en general con los requisitos y cerca de la carretera federal 184 se encuentra la laguna de Chichancanab. En particular tiene por ventaja no ser susceptible al impacto directo de un huracán. Al sur del estado de Quintana Roo se pueden encontrar condiciones adecuadas y podría ayudar a impulsar la economía. La bahía representa una protección natural contra los huracanes pero al ser un santuario no es viable, pero la laguna de Bacalar se encuentra cerca de la carretera federal 307 y tiene zonas sin riesgo de inundación. Finalmente al centro del estado de Campeche también hay condiciones que podrían ser adecuadas junto a la laguna Silvituc, a un costado de la carretera federal 186. Esta tampoco se encuentra en un sitio de impacto directo de huracanes.

## **2. Propuesta**

Con base en lo discutido anteriormente, la propuesta de esta tesis consiste en la sustitución de 1,054.8 MW de los proyectos de cogeneración eficiente CCE GCO 12 y 13, poniendo énfasis en que esto conllevaría una reducción en las emisiones de GEI y una mejora en la seguridad energética, especialmente por el incremento de la diversidad. Se propone que estos proyectos sean sustituidos por dos centrales nucleoelectricas con 12 reactores NuScale, diseño mejor posicionado en el MCDA, cada una. Estas representan un total de 1080 MW. Los sitios propuestos para estas centrales son junto a las lagunas de Chichancanab y Silvituc por estar más protegidas de los efectos de los huracanes. Como alternativa al diseño, en caso de optar por un reactor avanzado se propone elegir el diseño ABWR, que resulta consistente con los propuestos actualmente a nivel nacional.

Es importante notar que el fin de la propuesta es académico y pretende estudiar la factibilidad de incluir la energía nuclear en la matriz energética regional, sirviendo como

antecedente. Esto no sustituye los procesos de selección de diseño y sitio que se requieren para llevar a cabo la construcción de una central nucleoelectrica en el futuro, pero sirve como sustento para llevar la discusión a los sectores involucrados para su consideración.

### **3. Conclusiones**

Las conclusiones a las que se llegó en este trabajo son las siguientes:

- Los retos que presentan las fuentes renovables de energía hacen de la nuclear un complemento que puede sustituir a los hidrocarburos con el fin de reducir las emisiones de GEI. Especialmente debido a la necesidad de un suministro continuo y seguro de energía para satisfacer la carga base.
- En México y la península de Yucatán existen las condiciones para incrementar la capacidad nuclear. Aunque existen proyectos en la región para satisfacer la demanda de electricidad en el futuro, no se contempla actualmente el uso de energía nuclear pero sí de hidrocarburos.
- Los métodos de MCDA son una herramienta útil en la toma de decisiones ya que permiten llevarla a cabo de manera más sistemática.
- A pesar de las similitudes entre los métodos WSM y WPM, el primero presenta inconsistencias al cambiar el orden del ranking cuando se contempla un diferente número de alternativas por lo que no resulta confiable. El segundo no presenta este inconveniente.
- Los resultados del MCDA para la selección de reactores concuerdan con los beneficios que se esperan de los reactores pequeños como el NuScale y los reactores ABWR propuestos actualmente para México.
- La península de Yucatán cuenta con muchas áreas naturales protegidas por lo que el uso de una fuente de energía sin emisiones durante su operación y con baja intensidad de uso de suelo, como la nuclear, es recomendable.
- Existen diversas zonas en la península de Yucatán que cumplen con algunos de los requisitos y características preferibles para la construcción de un centrales nucleares, aunque es necesario llevar a cabo estudios más profundos para determinar si son adecuados.
- Finalmente, resulta viable considerar incluir a la energía nuclear en el desarrollo del sector eléctrico de la península de Yucatán sustituyendo a tecnologías que usan hidrocarburos como combustible. En esta tesis, se presentó la propuesta de la construcción de dos plantas con reactores NuScale en lugar de dos plantas de cogeneración eficiente.

Apéndice A

**Proyectos de Incremento de Capacidad en la Península de  
Yucatán**

*Proyectos de Incremento de Capacidad en la Península de Yucatán*

Proyecto	Tipo	Tecnología	Combustible	Región de Transmisión	Capacidad Firme (MW)	Año de Instalación
CBIO PP 04	Firme	Bioenergía	Gas natural	42-Merida	0.7	2016
CBIO PP 11	Optimización	Bioenergía	Gas natural	43-Cancun	0.56	A partir de 2019
CCC CFE 17	Firme	Ciclo Combinado	Gas natural	42-Merida	493.4	2020
CCE COG 16	Optimización	Cogeneración Eficiente	Gas natural	42-Merida	7.8	A partir de 2019
CCE COG 37	Optimización	Cogeneración Eficiente	Gas natural	42-Merida	12.0	A partir de 2019
CCE GCO 12	Genérico	Cogeneración Eficiente	Gas natural	42-Merida	527.4	A partir de 2019
CCE GCO 13	Genérico	Cogeneración Eficiente	Gas natural	42-Merida	527.4	A partir de 2019
CCE GCO 35	Genérico	Cogeneración Eficiente	Diésel	41-Lerma	167.5	A partir de 2019
CCE GCO 36	Genérico	Cogeneración Eficiente	Diésel	42-Merida	167.5	A partir de 2019
CCI AUT 09	Optimización	Combustión Interna	Diésel	43-Cancun	6.7	A partir de 2019
CCI AUT 11	Optimización	Combustión Interna	Gas natural	42-Merida	1.0	A partir de 2019
CE AUT 88	Optimización	Eólica		42-Merida	21.0	A partir de 2019
CE AUT 94	Optimización	Eólica		42-Merida	21.0	A partir de 2019
CE AUT 57	Subastas	Eólica		42-Merida	27.7	2018
CE OTR 03	Subastas	Eólica		42-Merida	9.0	2018
CE OTR 04	Subastas	Eólica		42-Merida	22.8	2018
CE PP 01	Firme	Eólica		42-Merida	9.0	2016
CE PP 13	Optimización	Eólica		42-Merida	9.0	A partir de 2019
CE PP 02	Subastas	Eólica		42-Merida	9.0	2018
CS AUT 61	Optimización	Solar fotovoltaica		42-Merida	25.7	A partir de 2019
CS AUT 64	Optimización	Solar fotovoltaica		42-Merida	9.8	A partir de 2019
CS GCO 24	Genérico	Solar Fotovoltaica		42-Merida	30.0	A partir de 2019
CS OTR 01	Firme	Solar fotovoltaica		44-Chetumal	30.0	2016
CS OTR 04	Firme	Solar fotovoltaica		44-Chetumal	30.0	2016
CS OTR 13	Subastas	Solar Fotovoltaica		42-Merida	70.0	2018
CS OTR 15	Subastas	Solar Fotovoltaica		42-Merida	18.0	2018
CS OTR 16	Subastas	Solar fotovoltaica		42-Merida	30.0	2018
CS OTR 19	Subastas	Solar Fotovoltaica		42-Merida	500.0	2018
CS PP 01	Firme	Solar fotovoltaica		42-Merida	18.0	2017
CS PP 124	Optimización	Solar fotovoltaica		42-Merida	16.0	A partir de 2019
CS PP 125	Optimización	Solar fotovoltaica		42-Merida	16.0	A partir de 2019
CS PP 201	Optimización	Solar fotovoltaica		41-Lerma	30.0	A partir de 2019

TABLA A.1. Proyectos de adición de capacidad en la región peninsular (SENER, 2016b)

## Apéndice B

### Matriz de Alternativas y Criterios

#### Código de criterios

**PE:** Potencia Eléctrica Neta (MW)

**QC:** Quemado de Combustible (GWd/t)

**FDN:** Frecuencia de Daño al Núcleo ( $\times 10^{-6}$  años<sup>-1</sup>)

**ER:** Exposición Ocupacional a Radiación (Persona-Sv/año)

**PNO:** Periodo de Funcionamiento sin Necesidad de Operador (horas)

**FD:** Factor de Disponibilidad (%)

**EP:** Enriquecimiento Promedio (%)

**VU:** Vida Útil (años)

**TC:** Tiempo de Construcción (meses)

**CN:** Costo Nivelado de Generación (US\$/MWh)

**CI:** Costo Instantáneo de Inversión ( $\times 10^6$ US\$)

**EO:** Experiencia de Operación (1:No, 2:Sí)

**ET:** Experiencia en México por Tipo (1:No, 2:Sí)

Diseño	Técnicos								No Técnicos				
	PE	QC	FDN	ER	PNO	FD	EP	VU	TC	CN	CI	EO	ET
ABWR	<sup>1</sup> 1350	<sup>1</sup> 50	<sup>1</sup> <1	<sup>1</sup> <1	<sup>2</sup> 72	<sup>3</sup> >0.9	<sup>1</sup> 4.0	<sup>1</sup> 60	<sup>2</sup> 54	<sup>4 5</sup> 103.5	<sup>6</sup> 5,242	2	2
AP1000	<sup>7</sup> 1100	<sup>7</sup> 60	<sup>7</sup> <0.5	<sup>7</sup> <0.7	<sup>8</sup> 72	<sup>7</sup> >0.93	<sup>7</sup> 4.8	<sup>7</sup> 60	<sup>8 9</sup> 60	<sup>4 5</sup> 150.8	<sup>10</sup> 6,640	1	1
APR1400	<sup>11</sup> 1400	<sup>11</sup> 45	<sup>11</sup> <1	<sup>11</sup> <1	<sup>12</sup> 72	<sup>11</sup> >0.90	<sup>11</sup> 4.1	<sup>11</sup> 60	<sup>11 9</sup> 60	<sup>4 13</sup> 80.64	<sup>4 13</sup> 3,843	2	1
VVER-1200	<sup>14</sup> 1082	<sup>14</sup> 60	<sup>14</sup> <1	<sup>14</sup> <0.4	<sup>15</sup> 72	<sup>14</sup> >0.90	<sup>14</sup> 4.8	<sup>14</sup> 60	<sup>16</sup> 57	<sup>4 5</sup> 161.3	<sup>17</sup> 6,600	1	1
NuScale	<sup>18</sup> 540	<sup>18</sup> 30	<sup>18</sup> <0.01	<sup>19</sup> <1	<sup>20</sup> 72	<sup>18</sup> >0.95	<sup>18</sup> <5.0	<sup>18</sup> 60	<sup>18</sup> 36	<sup>21 13</sup> 96.07	<sup>22 13</sup> 2,975	1	1
SMART	<sup>23</sup> 90	<sup>23</sup> 36	<sup>23</sup> <0.1	<sup>23</sup> <1	<sup>20</sup> 72	<sup>23</sup> >0.95	<sup>23</sup> 4.8	<sup>23</sup> 60	<sup>20</sup> 36	<sup>23 13</sup> 65.35	<sup>24 13</sup> 587.8	1	1
CAREM	<sup>20</sup> 300	<sup>20</sup> 24	<sup>20</sup> <0.1	<sup>19</sup> <1	<sup>20</sup> 36	<sup>20</sup> >0.90	<sup>20</sup> 3.1	<sup>20</sup> 60	<sup>20</sup> 36	<sup>19</sup> 161.3	<sup>19</sup> 1,959	1	1

TABLA B.1. Matriz de datos de las alternativas y criterios como indica la ecuación 7

<sup>1</sup>(IAEA, 2011e).

<sup>2</sup>(ININ, 2011).

<sup>3</sup>Se consideró un valor ligeramente mayor al reportado en (IAEA, 2011e) para hacerlo comparable con los valores teóricos de los demás diseños.

<sup>4</sup>(Priego Cuevas, 2010)

<sup>5</sup>Corregido por la diferencia en el costo instantáneo de inversión.

<sup>6</sup>(WNA, 2017a)

<sup>7</sup>(IAEA, 2011c).

<sup>8</sup>(ININ, 2009).

<sup>9</sup>Se incrementó en 12 meses para tomar en cuenta los retrasos que han presentado en la construcción de estos reactores.

<sup>10</sup>(EIA, 2016)

<sup>11</sup>(IAEA, 2011d).

<sup>12</sup>Se considera el valor del AP 1000 ya que ambos diseños son muy parecidos y no se encontró este dato para el APR 1400.

<sup>13</sup>Corregido por inflación a junio de 2017 con USA-DOL (2017).

<sup>14</sup>(IAEA, 2011a).

<sup>15</sup>(Renev, 2015).

<sup>16</sup>(Bazhenov, 2015).

<sup>17</sup>(Matin, nodate).

<sup>18</sup>(IAEA, nodate).

<sup>19</sup>Se utiliza el valor más alto de las alternativas. El costo de inversión se ajustó por la potencia.

<sup>20</sup>(IAEA, 2014a).

<sup>21</sup>(NuScale Power, 2017[b]).

<sup>22</sup>(NuScale Power, 2017[a]).

<sup>23</sup>(IAEA, 2011b).

<sup>24</sup>(Lee, 2010).

## Bibliografía

- Alonso Vargas, Gustavo, José Ramón Ramírez Sánchez, y Javier Cuitláhuac Palacios Hernández (2011). “Energía nuclear en México, como alternativa para la reducción de emisiones de  $CO_2$ ”. En: *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 27.3, pp. 271-273. URL: <http://www.revistas.unam.mx/index.php/rica/article/download/26302/24716>.
- Asociación Mexicana de Parques Industriales Privados (2018). *Ubicación de Parques Industriales*. Mapa. URL: <http://ampip.org.mx/es/mapa-parques-industriales/> (visitado 24-01-2018).
- Banco de México (2017). *Sistema de Información Económica*. URL: <http://www.banxico.org.mx/SieInternet/> (visitado 15-02-2017).
- Baños Ramírez, Othón y Jennifer Castañeda Navarrete (2007a). “Las tres economías de una región ganadora. la península de Yucatán, 1970-2004”. primera parte. En: *Comercio Exterior* 57.4.
- (2007b). “Las tres economías de una región ganadora. la península de Yucatán, 1970-2004”. segunda parte. En: *Comercio Exterior* 57.5.
- Bárcena Zubieta, Luis Raymundo (2012). “Evaluación económica y ambiental de la construcción de reactores nucleares avanzados (Generación III+) y sistemas de generación de electricidad mediante energías renovables”. Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Barragán Martínez, Alejandra Maribel (2008). “Estudio de técnicas de integración de indicadores para la selección de un nuevo reactor nuclear para México”. Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Barzilai, Jonathan y Boaz Golany (1994). “AHP Rank reversal, normalization and aggregation rules”. En: *Information Systems and Operational Research* 32 (2).
- Bazhenov, Dmitry (2015). “Rosatom Introduction and Global Offer”. En: Rosatom Overseas Seminar. The State Atomic Energy Corporation ROSATOM. Mexico City.
- Begon, Michael, Colin Townsend, y John Harper (2006). *Ecology: From Individuals to Ecosystems*. 4.<sup>a</sup> ed. Wiley-Blackwell.
- BP (2017). *Statistical Review of World Energy 2017*.
- Brunelli, Mateo (2015). *Introduction to the Analytic Hierarchy Process*. Springer Briefs in Operations Research. Springer.

- Buongiorno, Jacopo (2010). *Engineering of Nuclear Systems*. Notas de curso en el OpenCourseWare.
- Cabral, Juan B., Nadia Ayelen Luczywo, y José Luis Zanazzi (2016). “Scikit-Criteria. Colección de Métodos de Análisis Multi-Criterio Integrado Al Stack Científico de Python”. En: XLV Jornadas Argentinas de Informática E Investigación Operativa (45JAIIO)-XIV Simposio Argentino de Investigación Operativa (SIO). Buenos Aires, Argentina. URL: <http://45jaiio.sadio.org.ar/sites/default/files/Sio-23.pdf>.
- Castrejón Botello, David (2012). “Reducción de emisiones de GEI en el sector eléctrico: ¿Renovables o combustibles fósiles y energía nuclear?” En: *Revista Digital Universitaria de la Universidad Nacional* 13.10.
- Chu, Jennifer (2013). “Air pollution and early deaths in the United States”. Part I: Quantifying the impact of major sectors in 2005. En: *Atmospheric Environment* 79. (Visitado 19-08-2017).
- Comisión Federal de Electricidad (2012). *Costos y Parámetros de Referencia Para la Formulación de Proyectos de Inversión del Sector Eléctrico*.
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (2018). *Áreas Naturales Protegidas de México*. Mapa. URL: <http://sig.conanp.gob.mx/website/interactivo/ansp/> (visitado 23-01-2018).
- Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (2016). *Estrategia de Transición para Promover el Uso de Tecnologías y Combustibles Más Limpios*.
- Dzib Quijano, Sergio Abraham (2007). “Energía nuclear en México: ¿Sustentable y segura?” Tesis de licenciatura. Universidad de Quintana Roo.
- Espinosa Sosa, Saúl (2010). “Aplicación de modelos de toma de decisiones para la adquisición de un reactor nuclear avanzado en México”. Tesis de maestría. Instituto Politécnico Nacional.
- European Environment Agency (2014). *Correlation of energy consumption and GDP per person*. URL: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/correlation-of-per-capita-energy> (visitado 29-06-2017).
- European Nuclear Society (2016). *Nuclear power plants, world-wide*. URL: <https://www.euronuclear.org/info/encyclopedia/n/nuclear-power-plant-world-wide.htm> (visitado 24-02-2016).
- Foro de la Industria Nuclear Española (2016). *How do nuclear power plants withstand hurricanes?* URL: <http://www.foronuclear.org/es/ask-the-expert/120060-how-do-nuclear-power-plants-withstand-hurricanes-> (visitado 08-03-2016).
- Generation IV International Forum (2016). *GEN IV International Forum*. URL: [https://www.gen-4.org/gif/jcms/c\\_9334/origins](https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_9334/origins) (visitado 01-03-2016).
- Gibney, Ethan J. (2018). *Tropical Cyclone Tracks*. Mapa. URL: <https://www.nhc.noaa.gov/climo/>.
- Globalatom (2017). *Nuclear Power Engineering in the World*. URL: <http://www.globalatom.ru/en/wuclear> (visitado 18-08-2017).
- Gómez, María del Carmen y col. (2007). “Internalización de Externalidades en los Costos de Generación de Centrales Eléctricas de Carbón, Ciclo Combinado y Nucleares”. En: *2007 LAS/ANS Symposium*.

## BIBLIOGRAFÍA

- González Bello, César Ramón (2012). “Expansión de la generación nucleoelectrónica en México: Aspectos económicos, ambientales y de seguridad energética”. Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Google (2018). *Google Maps*. Mapa. URL: <https://www.google.com.mx/maps> (visitado 25-01-2018).
- Gürpınar, Aybars (2010). “An Overview of Site Survey, Site Selection and Site Evaluation for Nuclear Installations”. Diapositivas.
- H. Congreso de la Unión de los Estados Unidos Mexicanos (1917). *Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos*. Última reforma publicada DOF 27-01-16.
- (1976). *Ley Orgánica de la Administración Pública Federal*.
- (1985). *Ley Reglamentaria del Artículo 27 Constitucional en Materia Nuclear*.
- (2012). *Ley General de Cambio Climático*.
- (2014). *Ley de la Industria Eléctrica*.
- (2015). *Ley de Transición Energética*.
- Heard, B. P. y col. (2017). “Burden of proof: A comprehensive review of the feasibility of 100 % renewable-electricity systems”. En: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 76.
- Hore-Lacy, Ian (2006). *Nuclear energy in the 21st century*. 1.<sup>a</sup> ed. Academic Press.
- Instituto Mexicano para la Competitividad (2014). *¿Para qué sirven los Certificados de Energía Limpia que propone la reforma energética?* URL: [http://imco.org.mx/medio\\_ambiente/para-que-sirven-los-certificados-de-energia-limpia-que-propone-la-reforma-energetica/](http://imco.org.mx/medio_ambiente/para-que-sirven-los-certificados-de-energia-limpia-que-propone-la-reforma-energetica/) (visitado 04-07-2017).
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2010a). *Estadísticas históricas de México 2009*.
- (2010b). *Mapa Digital de México*. URL: [www.inegi.org.mx/geo/contenidos/mapadigital/](http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/mapadigital/) (visitado 11-01-2018).
- Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (2009). *Descripción del Reactor AP-1000. ABWR*.
- (2011). *El Reactor Avanzado de Agua en Ebullición. ABWR*.
- (2016). *Historia*. URL: <http://www.inin.gob.mx/plantillas/acercadeinin.cfm?clave=2> (visitado 01-03-2016).
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2015). *Climate Change 2014. Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- International Atomic Energy Agency (2004). *Radiation, People and the Environment*.
- (2006). *IAEA Safety Standards. for protecting people and the environment. Fundamental Safety Principles*. No. SF-1. Safety Fundamentals. Viena.
- (2011a). *Status Report 108. VVER-1200 (V-491)(VVER-1200 (V-49))1*.
- (2011b). *Status Report 77. System-Integrated Modular Advanced Reactor (SMART)*.
- (2011c). *Status Report 81. Advanced Passive PWR (AP 1000)*.
- (2011d). *Status Report 83. Advanced Power Reactor 1400 MWe (APR1400)*.
- (2011e). *Status Report 97. Advanced Boiling Water Reactor (ABWR)*.
- (2013). *Advanced Reactors Information System*. URL: <https://www.iaea.org/pris/> (visitado 15-03-2018).
- (2014a). *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments. A Supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS)*.
- (2014b). *Nuclear Technology Review*.

- International Atomic Energy Agency (2015). *IAEA Safety Standards*. for protecting people and the environment. *Site Survey and Site Selection for Nuclear Installations*. No. SSG-35. Safety Guides. Viena.
- (2016a). *30 Years after Chernobyl: IAEA Continues to Support Global Efforts to Help Affected Regions*. URL: <https://www.iaea.org/newscenter/news/30-years-after-chernobyl-iaea-continues-to-support-global-efforts-to-help-affected-regions> (visitado 03-01-2017).
- (2016b). *IAEA Safety Standards*. for protecting people and the environment. *Site Evaluation for Nuclear Installations*. No. NS-R-3 (Rev. 1). Safety Requirements. Viena.
- (2017). *Power Reactor Information System*. URL: <https://www.iaea.org/pris/> (visitado 16-08-2017).
- (s.f.). *NuScale Power Modular and Scalable Reactor*.
- International Energy Agency (2015a). *Key World Energy Statistics*. URL: [https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld\\_Statistics\\_2015.pdf](https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld_Statistics_2015.pdf).
- (2015b). *What is energy security?* URL: <https://www.iea.org/topics/energysecurity/subtopics/whatisenergysecurity/> (visitado 09-05-2017).
- International Energy Agency y Nuclear Energy Agency (2015). *Projected Costs of Generating Electricity, 2015 Edition*.
- International Renewable Energy Agency (2017). *Levelized Cost of Electricity 2010-2016*. URL: <http://resourceirena.irena.org/gateway/dashboard/?topic=3&subTopic=1057> (visitado 04-07-2017).
- Ishizaka, Alessio y Philippe Nemery (2013). *Multi-Criteria Decision Analysis. Methods and Software*. Wiley.
- Jurado Pineda, Mayverena (2005). “Análisis de las principales ventajas y desventajas de la instalación de un nuevo tipo de reactor nuclear en México”. Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Kumar, Abhishek y col. (2017). “A review of multi criteria decision making (MCDM) towards sustainable renewable energy development”. En: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 69.
- Lamarsh, John R. y Anthony J. Baratta (2001). *Introduction to Nuclear Engineering*. 3.<sup>a</sup> ed. Prentice Hall.
- Leal Cobos, Carlos Daniel (2009). “Análisis de expansión del sistema eléctrico nacional con la incorporación de reactores nucleares avanzados”. Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Lee, Won Jae (2010). “The SMART Reactor”. Diapositivas.
- Loken, Espen (2007). “Use of multicriteria decision analysis methods for energy planning problems”. En: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 11 (7).
- Maqueda Zamora, Martín Roberto y Luis Agustín Sánchez Viveros (2008). “Curvas de demanda horaria de energía eléctrica en el sector doméstico en dos regiones de México”. En:
- Marder, Jenny (2011). *Nuclear Reactors and Nuclear Bombs: What Defines the Differences?* URL: <http://www.pbs.org/newshour/rundown/what-is-the-difference-between-the-nuclear-material-in-a-bomb-versus-a-reactor/> (visitado 20-02-2017).

## BIBLIOGRAFÍA

- Matin, Abdul (s.f.). *The Economics of the Rooppur Nuclear Power Plant*. URL: <https://www.thedailystar.net/op-ed/economics/the-economics-the-rooppur-nuclear-power-plant-1369345>.
- McDonald, Robert I. y col. (2009). “Energy Sprawl or Energy Efficiency: Climate Policy Impacts on Natural Habitat for the United States of America”. En: *PLoS ONE* 4 (8).
- Menegaki, Angeliki N. (2014). “On energy consumption and GDP studies; A meta-analysis of the last two decades”. En: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 29.
- Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales República Dominicana (2012). *Síntesis del ENT y plan de acción de la Evaluación de Necesidades Tecnológicas -ENT-para la mitigación en el sector energético de la República Dominicana*.
- Miyasaki, Makoto y Ryugo Hayano (2016). “Individual external dose monitoring of all citizens of Date City by passive dosimeter 5 to 51 months after the Fukushima NPP accident (series). 1. Comparison of individual dose with ambient dose rate monitored by aircraft surveys”. En: *Journal of Radiological Protection* 37.1.
- Montis, Andrea de y col. (2005). “Assessing the quality of different MCDA methods”. En: *Alternatives for Environmental Valuation*. Ed. por Michael Getzner, Clive L. Spash, y Sigrid Stagl. Routledge. Cap. 5, pp. 99-133.
- Murray, Raymond L. y Keith E. Holbert (2015). *Nuclear Energy: An introduction to the concepts, systems, and applications of nuclear processes*. 7.<sup>a</sup> ed. Elsevier.
- Nave, Rod (2016). *HyperPhysics*. URL: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hframe.html> (visitado 07-02-2017).
- Nuclear Energy Agency (2010). *Comparing Nuclear Accident Risks with Those from Other Energy Sources*.
- Nuclear Energy Institute (2012). *Nuclear Energy Facilities Prove Resilience During Hurricane Sandy*. URL: <http://www.nei.org/News-Media/Media-Room/News-Releases/Nuclear-Energy-Facilities-Prove-Resilience-During> (visitado 08-03-2016).
- (2016a). *Through the Decades: History of US Nuclear Energy Facilities Responding to Extreme Natural Challenges*. URL: <http://www.nei.org/Master-Document-Folder/Backgrounders/Fact-Sheets/Through-the-Decades-History-of-US-Nuclear-Energy-F> (visitado 08-03-2016).
- (2016b). *US nuclear plants set reliability record in 2015*. URL: <http://www.nei.org/News-Media/News/News-Archives/US-Nuclear-Plants-Set-Reliability-Record-in-2015> (visitado 25-02-2016).
- (2017). *Job Creation and Economic Benefits of Nuclear Energy*. URL: <https://www.nei.org/Master-Document-Folder/Backgrounders/Fact-Sheets/Job-Creation-and-Economic-Benefits-of-Nuclear-Ener?feed=factsheet> (visitado 30-06-2017).
- NuScale Power (2017[a]). *Construction Cost for a NuScale Nuclear Power Plant*. URL: <http://www.nuscalepower.com/smr-benefits/economical/construction-cost> (visitado 25-09-2017).
- (2017[b]). *Operating Costs for a NuScale Nuclear Power Plant*. URL: <http://www.nuscalepower.com/smr-benefits/economical/operating-costs> (visitado 25-09-2017).
- Ohio State University (2011). *Getting energy from combustion*. URL: <http://www.physics.ohio-state.edu/~wilkins/energy/Resources/Lectures/combenergy.html> (visitado 08-06-2016).

- Okamoto, Kazuto (1984). “Radiological impact of a natural gas power plant”. En: International Radiation Protection Association Congress 6.
- Pakistan Nuclear Regulatory Authority (2015). *Technical report on Radiological Impact of Coal-fired Power Plants*.
- Palacios Hernández, Javier Cuitláhuac (2016). *Percepción pública de la energía nuclear en México después de Fukushima*.
- Palacios, Javier C. y col. (2004). “Levelized costs for nuclear, gas and coal for Electricity, under the Mexican scenario”. En: *Americas Nuclear Energy Symposium (ANES 2004)*. Vol. 36.
- Pohekar, S.D. y M. Ramachandran (2004). “Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning - A review”. En: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 8 (4).
- Population Labs (2011). *Mexico Population Map*. Mapa. URL: [http://www.populationlabs.com/Mexico\\_Population.asp](http://www.populationlabs.com/Mexico_Population.asp) (visitado 19-02-2018).
- Priego Cuevas, Emmanuel (2010). “Escenarios económicos para la construcción de un nuevo reactor nuclear en México”. Tesis de maestría. Instituto Politécnico Nacional.
- Public Broadcasting Service (2006). *The path to nuclear fission: The story of Lise Meitner and Otto Hahn*.
- Ramírez Galicia, Ricardo Javier (2009). “Energía nuclear como una solución sustentable para satisfacer la demanda de energía eléctrica”. Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Renev, Alexander (2015). “Rosatom Approach to NPP Safety”. En: Rosatom Overseas Seminar. The State Atomic Energy Corporation ROSATOM. Mexico City.
- Reyes Ramírez, Ricardo (2006). “Metodología para la comparación integral de reactores nucleares evolutivos”. Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Rodríguez Ángel, Elda Beatriz (2013). “Estudio de factibilidad de una planta nuclear dual; Desalación de agua de mar y generación de energía eléctrica en México”. Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Saidi, Kais, Mohammad Mafizur Rahman, y Mounira Amamri (2017). “The causal nexus between economic growth and energy consumption: New evidence from global panel of 53 countries”. En: *Sustainable Cities and Society* 33.
- Salazar Moreno, Alfonso (2010). “Prospectiva del uso de la energía nuclear para generar electricidad para México”. Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes (2017). *Atlas de Comunicaciones y Transportes*. Mapa. URL: <http://www.sct.gob.mx/planeacion/cartografia/mapa-nacional/> (visitado 15-01-2018).
- Secretaría de Economía (2017[a]). *Seguimiento Precio del Uranio*. URL: <http://portalweb.sgm.gob.mx/economia/es/energeticos/uranio.html> (visitado 15-02-2017).
- (2017[b]). *Seguimiento Precio Gas Natural - Datos*. URL: <http://portalweb.sgm.gob.mx/economia/es/energeticos/precios/701-seguimiento-precio-gas-natural-datos.html> (visitado 15-02-2017).
- Secretaría de Energía (2010). *Sistema de Información Energética*. URL: <http://sie.energia.gob.mx/> (visitado 16-07-2015).
- (2012). *Estrategia Nacional de Energía 2012-2026*.
- (2013). *Estrategia Nacional de Energía 2013-2027*.

## BIBLIOGRAFÍA

---

- (2016a). *Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2015-2029*.
- (2016b). *Programa Indicativo para la Instalación y Retiro de Centrales Eléctricas*.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2013). *Estrategia Nacional de Cambio Climático*.
- Siraj, Sajid, Ludmil Mikhailov, y John A. Keane (2015). “PriEsT: an interactive decision support tool to estimate priorities from pairwise comparison judgments”. En: *International Transactions in Operational Research* 22.2, pp. 217-235. ISSN: 1475-3995. DOI: 10.1111/itor.12054. URL: <http://dx.doi.org/10.1111/itor.12054>.
- Smith, Anne (2017). *Nuclear Reactor Core*. URL: <https://visual.ly/community/infographic/science/nuclear-reactor-core-schematic> (visitado 18-08-2017).
- Sosa Palacios, Edith y Maria Guadalupe Trejo Galicia (2004). “Análisis de escenarios de la participación de la energía nuclear en el sector eléctrico mexicano utilizando el programa DECADES”. Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Sovacool, Benjamin K. (2008). “Valuing the greenhouse gas emissions from nuclear power: A critical survey”. En: *Energy Policy* 36.8.
- Spanth, Pamela y Margaret Mann (2000). *Life Cycle Assesment of a Natural Gas Combined-Cycle Power Generation System*. National Renewable Energy Laboratory.
- Triantaphyllou, Evangelos (2000). *Multi-Criteria Decision Making Methods. A Comparative Study*. Springer.
- United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (2008). *UNSCEAR 2008 Report*. URL: [http://www.unscear.org/unscear/en/publications/2008\\_1.html](http://www.unscear.org/unscear/en/publications/2008_1.html).
- United States Department of Labor (2017). *CPI Inflation Calculator*. URL: [https://www.bls.gov/data/inflation\\_calculator.htm](https://www.bls.gov/data/inflation_calculator.htm) (visitado 27-11-2017).
- United States Nuclear Regulatory Commission (2015). *Nuclear poison (or neutron posion)*. URL: <http://www.nrc.gov/reading-rm/basic-ref/glossary/nuclear-poison-or-neutron-poison.html> (visitado 29-02-2016).
- Uresti Chávez, Rodolfo (2005). “Estudio de la viabilidad de la construcción de una central nucleoelectrica en la República Mexicana”. Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.
- U.S. Department Of Energy (1993). *Nuclear physics and reactor theory*. Vol. 1. DOE Fundamentals Handbook. U.S. Department Of Energy.
- U.S. Energy Information Administration (2016). *Capital Cost Estimates for Utility Scale Electricity Generating Plant*.
- (2017a). *Annual Energy Outlook 2017. with projections to 2050*.
- (2017b). *Electric Power Monthly*.
- Wang, Jiang-Jiang y col. (2009). “Review on multiple-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making”. En: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13 (9).
- Wikimedia Foundation (s.f.). *Wikimedia Commons*. URL: <https://commons.wikimedia.org>.
- World Commision on Environment and Development (1987). *Our Common Future*.
- World Energy Council (2013). *World Energy Perspective. Cost of Energy Technologies*.
- World Nuclear Association (2011). *Comparison of Lifecycle Greenhouse Gas Emissions of Various Electricity Generation Sources*.

- World Nuclear Association (2014). *Outline History of Nuclear Energy*. URL: <http://www.world-nuclear.org/info/Current-and-Future-Generation/Outline-History-of-Nuclear-Energy/> (visitado 24-02-2016).
- (2015a). *Advanced Nuclear Power Reactors*. URL: <http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/advanced-nuclear-power-reactors.aspx> (visitado 29-02-2016).
- (2015b). *Generation IV Nuclear Reactors*. URL: <http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/generation-iv-nuclear-reactors.aspx> (visitado 01-03-2016).
- (2015c). *Nuclear Power in Bangladesh*. URL: <http://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-a-f/bangladesh.aspx> (visitado 01-03-2016).
- (2015d). *Nuclear Power in Belarus*. URL: <http://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-a-f/belarus.aspx> (visitado 01-03-2016).
- (2015e). *Nuclear Power in Mexico*. URL: <http://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-g-n/mexico.aspx> (visitado 01-03-2016).
- (2015f). *Nuclear Power in the United Arab Emirates*. URL: <http://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-t-z/united-arab-emirates.aspx> (visitado 01-03-2016).
- (2015g). *Nuclear Power in Turkey*. URL: <http://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-t-z/turkey.aspx> (visitado 01-03-2016).
- (2015h). *Nuclear Power in Vietnam*. URL: <http://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-t-z/vietnam.aspx> (visitado 01-03-2016).
- (2015i). *Plans For New Reactors Worldwide*. URL: <http://www.world-nuclear.org/info/Current-and-Future-Generation/Plans-For-New-Reactors-Worldwide/> (visitado 10-07-2015).
- (2015j). *The Nuclear Renaissance*. URL: <http://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/the-nuclear-renaissance.aspx> (visitado 02-03-2016).
- (2016a). *Chernobyl Accident 1986*. URL: <http://www.world-nuclear.org/information-library/safety-and-security/safety-of-plants/chernobyl-accident.aspx> (visitado 03-01-2017).
- (2016b). *Emerging Nuclear Energy Countries*. URL: <http://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/others/emerging-nuclear-energy-countries.aspx> (visitado 01-03-2016).
- (2016c). *Fast Neutron Reactors*. URL: <http://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/fast-neutron-reactors.aspx> (visitado 20-12-2016).
- (2016d). *Mixed Oxide (MOX) Fuel*. URL: <http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/fuel-recycling/mixed-oxide-fuel-mox.aspx> (visitado 23-11-2016).
- (2016e). *Nuclear Fuel Fabrication*. URL: <http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/conversion-enrichment-and-fabrication/fuel-fabrication.aspx> (visitado 19-10-2016).

## BIBLIOGRAFÍA

- (2016f). *Nuclear Power in Lithuania*. URL: <http://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-g-n/lithuania.aspx> (visitado 01-03-2016).
- (2016g). *Nuclear Power in the World Today*. URL: <http://www.world-nuclear.org/info/Current-and-Future-Generation/Nuclear-Power-in-the-World-Today/> (visitado 25-02-2016).
- (2016h). *Processing of Used Nuclear Fuel*. URL: <http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/fuel-recycling/processing-of-used-nuclear-fuel.aspx> (visitado 23-11-2016).
- (2016i). *Safety of Nuclear Power Reactors*. URL: <http://www.world-nuclear.org/information-library/safety-and-security/safety-of-plants/safety-of-nuclear-power-reactors.aspx> (visitado 18-01-2017).
- (2016j). *Small Nuclear Power Reactors*. URL: <http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/small-nuclear-power-reactors.aspx> (visitado 29-02-2016).
- (2016k). *Supply of Uranium*. URL: <http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/uranium-resources/supply-of-uranium.aspx> (visitado 11-10-2016).
- (2016l). *The nuclear fuel cycle*. URL: <http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/introduction/nuclear-fuel-cycle-overview.aspx> (visitado 11-10-2016).
- (2017a). *Nuclear Power Economics and Project Structuring*.
- (2017b). *Nuclear Power in the China*. URL: <http://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-a-f/china-nuclear-power.aspx> (visitado 16-08-2017).
- (2017c). *Nuclear Power in the France*. URL: <http://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-g-n/japan-nuclear-power.aspx> (visitado 16-08-2017).
- (2017d). *Nuclear Power in the Japan*. URL: <http://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-a-f/france.aspx> (visitado 16-08-2017).
- (2017e). *Nuclear Power in the USA*. URL: <http://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-t-z/usa-nuclear-power.aspx> (visitado 16-08-2017).
- (2016[m]). *World Nuclear Association Image Library*. URL: <http://www.world-nuclear.org/gallery.aspx> (visitado 20-12-2016).
- World Nuclear News (2015). *Economic cost of Japan's nuclear shutdown*. URL: <http://www.world-nuclear-news.org/NP-Economic-cost-of-Japans-nuclear-shutdown-1404151.html> (visitado 25-02-2016).
- (2016). *Grid connection for first Korean APR-1400*. URL: <http://www.world-nuclear-news.org/NN-Grid-connection-for-first-Korean-APR-1400-1901164.html> (visitado 24-02-2016).
- (2017a). *Japan to benefit from reactor restarts, says IEEJ*. URL: <http://world-nuclear-news.org/NP-Japan-to-benefit-from-reactor-restarts-says-IEEJ-0308174.html> (visitado 16-08-2017).

## BIBLIOGRAFÍA

---

World Nuclear News (2017[b]). *Innovative ways of funding nuclear power projects*. URL: <http://www.world-nuclear-news.org/V-Innovative-ways-of-funding-nuclear-power-projects-18021601.html> (visitado 06-07-2017).

## Siglas

- ABWR:** Reactor Avanzado de Agua en Ebullición (Advanced Boiling Water Reactor). 32, 33, 51, 52, 57, 78–80
- ACR:** Reactor CANada Deuterio Uranio Avanzado (Advanced CANada Deuterium Uranium Reactor). 32, 33
- AHP:** Proceso de Jerarquía Analítica (Analytic Hierarchy Process). 51, 53, 55, 57, 63, 64, 76, 79
- ALARA:** Tan Baja Como sea Razonablemente Posible (As Low As Reasonable Achievable). 59
- AP 1000:** Reactor de Agua a Presión Pasivo Avanzado (Advanced Passive Pressurized Water Reactor). 33, 51, 52, 57, 58, 78, 84
- AP 600:** Reactor de Agua a Presión Pasivo Avanzado 600 (Advanced Passive Pressurized Water Reactor 600). 32
- APR 1400:** Reactor de Potencia Avanzado 1400 (Advanced Power Reactor 1400). 57, 59, 60, 79, 84
- APWR:** Reactor Avanzado de Agua a Presión (Advanced Pressurized Water Reactor). 52
- CAREM:** Central Argentina de Elementos Modulares. 57, 62
- CFE:** Comisión Federal de Electricidad. 32, 39, 40, 76
- CNSNS:** Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias. 39, 76
- CRE:** Comisión Reguladora de Energía. 38, 42
- ELECTRE:** Eliminación y Elección Representando la Realidad (Elimination Et Choix Traduisant la Réalité). 51
- ENE:** Estrategia Nacional de Energía. 39, 40
- EPR:** Reactor de Potencia Evolucionario (Evolutionary Power Reactor). 32, 33, 51, 52
- ESBWR:** Reactor de Agua en Ebullición Económico Simplificado (Economic Simplified Boiling Water Reactor). 51, 52
- FIS:** Sistema de Inferencia Difuso (Fuzzy Inference System). 51
- GEI:** Gase de Efecto Invernadero. 37, 38, 75, 76, 79, 80
- GT-MHR:** Reactor Modular de Helio con Turbina de Gas (Gas Turbine - Modular Helium Reactor). 51
- IAEA:** Agencia Internacional de Energía Atómica (International Atomic Energy Agency). 2, 23, 25, 65

- 
- ICRP:** Comisión Internacional de Protección Radiológica (International Commission on Radiological Protection). 25
- ININ:** Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares. 39, 76
- MAUT:** Teoría de Utilidad de Múltiples Atributos (Multilpe Attribute Value Theory). 63
- MCDA:** Análisis de Decisiones Multi Criterio (Multiple Criteria Decision Analysis). 50, 55, 63, 65, 76, 79, 80
- MIT:** Instituto Tecnológico de Massachusetts (Massachusetts Institute of Technology). 26
- MtCO<sub>2</sub>e:** Megatoneladas de CO<sub>2</sub> equivalentes. 48
- OECD:** Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (Organization for Economic Co-operation and Development). 32
- PBMR:** Reactor Modular de Cama de Esferas (Pebble Bed Modular Reactor). 51
- PIIRCE:** Programa Indicativo para la Instalación y Retiro de Centrales Eléctricas. 40, 41, 43, 47
- PRA:** Evaluación Probabilística de Riesgos (Probabilistic Risk Assessment). 26
- PRODESEN:** Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional. 39, 41–43
- PROMETHEE:** Método de Organización por Escala de Preferencias para Evaluación Enriquecida (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation). 51
- PSE:** Prospectiva del Sector Eléctrico. 39, 42
- SEN:** Sistema Eléctrico Nacional. 38–41, 43
- SENER:** Secretaría de Energía. 38–40
- SIN:** Sistema Interconectado Nacional. 40, 41, 47
- SMART:** Reactor Avanzado Modular de Sistema-integrado (System-integrated Modular Advanced Reactor). 57, 62, 78, 79
- SMRs:** Reactores Modulares Pequeños/Reactores Pequeños y Medianos (Small Modular Reactors/Small and Medium-sized Reactors). 22, 76, 78, 79
- TOPSIS:** Técnica para Ordenar las Preferencias mediante Similitud a la Solución Ideal (The Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution). 51, 63
- UNSCEAR:** Comité Científico de las Naciones Unidas sobre los Efectos de la Radiación (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation). 25
- VVER-1200:** Reactor Energético de Agua-Agua (Vodo-Vodyanoi Energetichesky Reactor 1200). 57, 60, 78
- WPM:** Modelo de Producto Ponderado (Weighted Product Model). 51, 63, 76, 78, 80
- WSM:** Modelo de Suma Ponderada (Weighted Sum Model). 51, 63, 64, 76, 78, 80