



**Facultad de Ciencias Económicas y Administrativas  
Escuela de Ingeniería Comercial**

**“Generación eléctrica mediante energía nuclear en Chile, y su  
impacto en la economía nacional”**

MEMORIA PARA OPTAR

AL GRADO DE LICENCIADO EN CIENCIAS EN LA ADMINISTRACIÓN  
DE EMPRESAS Y AL TÍTULO DE INGENIERO COMERCIAL

**MAURICIO ESTEBAN LEIVA VEAS**

**Profesora Guía: Sra. Luz A. Arévalo González**

**Viña del Mar, 2017**

## **DEDICATORIA**

Dedico esta tesis a mi madre, por su constante apoyo en todos los caminos que he querido recorrer en mi vida y a su constante motivación.

## **AGRADECIMIENTOS**

Al terminar este proceso debo comentar que todo lo que he aprendido en la escuela de Ingeniería Comercial de la universidad de Valparaíso, me sirvió para desarrollarme como un buen profesional y que supero mis expectativas, por lo cual quiero agradecer a todo el personal que compartió con mi persona durante los años de formación, la buena disposición y calidad en la enseñanza.

Quiero agradecer a mis amigos, compañeros de curso y de trabajo por el apoyo que me entregaron a lo largo de todo el tiempo que dedique a terminar la carrera, ya que debido a la distancia de mi trabajo siempre mantuvieron una buena disposición para compartir la información y ayudarme en los temas que menos dominaba.

Quiero destacar el apoyo de la profesora Luz Arévalo G., quien tiene un sólido conocimiento en economía y gracias a ella pude entender la realidad de nuestro país y sobre todo por su buena disposición y calidad en la enseñanza.

Muchas gracias.

**Mauricio Leiva Veas**

## ÍNDICE

DEDICATORIA .....	ii
AGRADECIMIENTOS .....	iii
ÍNDICE .....	iv
RESUMEN .....	vi
ABSTRACT .....	vii
INTRODUCCIÓN .....	1
1.1.1.  Objetivo general.....	4
1.1.2.  Objetivos Específicos .....	4
1.1.3.  Formulación de preguntas .....	5
1.1.4.  Descripción de la metodología de la investigación .....	5
CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO .....	7
1.2.    Fuentes de generación de energía .....	7
1.3.    Energías renovables .....	8
1.4.    Energías no renovables .....	9
1.5.    Energía nuclear.....	11
1.6.    Energía nuclear en hechos históricos .....	11
1.7.    La energía nuclear en el mundo .....	13
1.8.    La economía de la energía nuclear.....	14
1.9.    Competitividad de la energía nuclear.....	15
CAPÍTULO II: LA EVOLUCIÓN DE LA ENERGÍA NUCLEAR EN CHILE.....	17
2.1.    Hechos históricos.....	17
2.2.    Estudios realizados.....	19
2.3.    Opinión ciudadana .....	22
2.4.    Matriz energética actual .....	25
2.5.    Reactores en funcionamiento .....	28
2.5.1.  Reactor Experimental Chileno (RECH-1).....	29
2.5.2.  Reactor Experimental Chileno (RECH-2).....	30
2.6.    Disposición política para implementación .....	31

CAPÍTULO III: ANÁLISIS DE LA GENERACIÓN ELÉCTRICA MEDIANTE ENERGÍA NUCLEAR EN CHILE Y SU IMPACTO EN LA ECONOMÍA NACIONAL .....	33
3.1 Tipos de reactores nucleares .....	33
3.2 Reactor PWR .....	36
3.3 Reactor BWR .....	38
3.4 Combustible nuclear .....	39
3.5 Competitividad de la energía nuclear .....	40
3.6 Marco legal .....	42
3.6.1. Marco eléctrico .....	42
3.6.2. Marco Nuclear .....	43
3.6.3. Marco Ambiental .....	44
3.7 Uso de la energía en Chile .....	45
3.8 Mejoramiento mercado eléctrico .....	46
3.8.1. Efectos de la incorporación de la Energía Nuclear en la Matriz Chilena .....	46
3.8.2. Venta de excedentes .....	47
3.9 Mirada macroeconómica .....	47
3.9.1. Políticas públicas futuras .....	48
3.9.2. Situación con el estado como inversor .....	50
3.9.3. Situación con el Inversión privada .....	52
3.10 Mejoramiento de la balanza de pagos .....	54
CONCLUSIONES .....	57
BIBLIOGRAFIA .....	61
ANEXOS .....	65
Anexo 1: Fisión Nuclear .....	65
Anexo 2: Accidente central Fukushima .....	69
Anexo 3: Enriquecimiento del Uranio .....	72

## **RESUMEN**

Esta tesis tiene como finalidad recopilar información para presentar una propuesta de generación eléctrica nuclear y ser un aporte para futuros estudios, analizando el impacto que tendrá en la economía nacional con una mirada macroeconómica sobre las políticas públicas y privadas que serán parte de la matriz energética para el futuro del país.

La información se analiza desde los hechos históricos hasta las diferentes formas de generación, tomando como consideración el medio ambiente y los diferentes modelos de aplicación que se han llevado a la práctica en diferentes países del mundo.

Finalmente se entregan las conclusiones sobre el impacto económico que generara en la balanza de pagos del país y como la implementación podrá generar beneficios no solo del punto de vista económico, también en el desarrollo de nuevas tecnologías como en mejoras a la matriz energética del país.

## **ABSTRACT**

This thesis aims to collect information to present a proposal for nuclear power generation and be a contribution for future studies, analysing the impact it will have on the national economy with a macroeconomic perspective on the public and private policies that will be part of the energy matrix for the future of the country.

The information is analysed from the historical facts to the different forms of generation, taking as consideration the environment and the different models of application that have been put into practice in different countries of the world.

Finally, the conclusions on the economic impact that it will generate in the country's balance of payments and how the implementation will generate benefits not only from the economic point of view, but also in the development of new technologies as well as in improvements to the country's energy matrix.

## INTRODUCCIÓN

El escenario mundial parece enfocarse hacia un mundo de energías alternativas y limpias, como las llamadas verdes y renovables. Sin embargo, existe mucha desinformación al respecto ya que las energías renovables si bien son limpias presentan un factor de planta o generación muy por debajo de sus rivales de quemados fósiles, un ejemplo sencillo de esto es que durante la noche no se puede generar energía fotovoltaica y sin viento no se puede generar energía eólica. Además, el hecho que Chile es un país en vía de desarrollo y un gran mercado para la inversión extranjera, también centra un precedente en cuanto a la tecnología del país y como su nivel de ingeniería crece, esto puede abrir nuevas posibilidades no solo del punto de vista energético, también en el ámbito de nuevos profesionales, generando nuevos puestos de trabajo, y evitando emisiones de gases de efecto invernadero y permitirá utilizar emplazamientos más cercanos a las ciudades. Además, desde el punto de vista económico se podrían generar excedentes para ser vendidos a países vecinos.

Existe mucha información con respecto a la implementación de energía nuclear en el mundo, sin ir tan lejos encontramos a países como Brasil y Argentina que ya cuentan con centrales nucleares desde hace ya varios años, países como China están creciendo en sus investigaciones sobre el tema y empezaron la construcción de centrales este año. Estados Unidos un país directo en la lucha del calentamiento global acaba de aprobar la construcción de nuevas plantas de

energía nuclear. Japón cambia antiguos reactores por nuevos, y como se observa por mucho que la energía renovable suene como la solución futura desde un punto de vista ecológico, desde la vista técnica no es la solución definitiva.

Chile es una economía en vías de desarrollo y como todo país, el crecimiento económico está estrechamente relacionado con la necesidad energética que se vincula en éste. Cabe mencionar, que la energía debe ser estable y segura cumpliendo con los estándares internacionales, lo que para nuestros días sería una generación limpia y sin emisión de gases de efecto invernadero. Por lo cual tomando en consideración las prácticas y políticas públicas sobre la instalación de plantas del tipo térmicas y ante la dependencia de combustibles fósiles es que resulta importante analizar otras fuentes de energía.

Se debe considerar que Chile es el país más largo del mundo y que contempla uno de los sistemas eléctricos más complejos, en el cual se integran una serie de generadoras eléctricas que permiten que el país funcione como lo conocemos, pero a su vez es dependiente de factores externos que son potencialmente riesgosos ante ciertos escenarios que no son controlables, tales como son la dependencia de economías extranjeras para suplir combustibles, problemas políticos externos, problemas de sequía y el gran tamaño de nuestro sistema eléctrico.

Es por esto que plantear el ingreso de nuevas tecnologías a la matriz energética es primordial y de carácter urgente, ya que los estudios demoran un tiempo en concluirse y a su vez la construcción de nuevas centrales alarga más este plazo de entrada en funcionamiento.

En el escenario actual, el mundo se encuentra en un uso masivo de recursos para la generación de energía. Desde que la guerra de las corrientes se inició en el año 1880 (Francescutti, 2008) es que la humanidad experimento un cambio en su existencia y le permitió alargar los días y por ende mejorar la calidad de vida de las personas, a su vez mejoro la producción e influyo en la globalización que actualmente permite la cúspide del desarrollo humano (ONGAWA, 2013). Las fuentes de energía son variables, desde la utilización de energías naturales que son transformadas para convertirse en energía eléctrica hasta otras que son generadas mediante la acción completa de la mano del hombre. Las energías convencionales están en la palestra ya que existe una corriente por la conservación del planeta que está orientada hacia las energías verdes y más limpias lo cual ha generado diversos debates en el ámbito político, educacional, cultural y organizacional. Cabe mencionar que las energías renovables se están convirtiendo en materia de estudio para todas las naciones tanto industrializados como economías que se encuentran en desarrollo ya que presentan un sinfín de beneficios a sus economías, programas sociales y políticas medioambientales (André & Castro, 211).

Las principales razones de esta búsqueda de energías limpias se debe principalmente a la gran volatilidad que están presentando los mercados de los combustibles fósiles, eso sumado a los conflictos armados (San Juan, 2015) que se han estado desarrollando en la última década han llevado a que los países no puedan programar su matriz energética con suficiente seguridad en el largo plazo. Debido a esto es que han aumentado las políticas en torno a la energía de los diferentes países con el fin de elaborar una estrategia que reúna diversas formas de producción de energía con la preocupación de que esto minimice el impacto ambiental y sea una opción duradera en el tiempo.

#### **1.1.1. Objetivo general**

Analizar la generación eléctrica mediante energía nuclear en Chile para determinar el impacto en la economía nacional.

#### **1.1.2. Objetivos Específicos**

1. Analizar el mercado de la energía nuclear.
2. Comprobar normativas y regulación, nacional como internacional de la energía nuclear.
3. Analizar los beneficios y costos de la generación de energía nuclear, en el país, a nivel social como empresarial.

4. Comparar económicamente esta alternativa de energía con otras formas de generación.
5. Evaluar los aspectos económicos sobre políticas energéticas a largo plazo.

### **1.1.3. Formulación de preguntas**

1. ¿Cuál es el escenario eléctrico Chileno en la actualidad?
2. ¿Cuál es la política energética a largo plazo en Chile?
3. ¿Cómo está cambiando el mundo en materia de generación?
4. ¿Qué es la energía nuclear?
5. ¿Qué tipos de reactores existen?
6. ¿Cuál es el costo de generación del [kW/h]?
7. ¿Cuál es la opinión ciudadana respecto de la energía nuclear?
8. ¿Cuáles son las ventajas y desventajas de esta energía?
9. ¿Cuáles serían las políticas públicas en el futuro?

### **1.1.4. Descripción de la metodología de la investigación**

Con respecto a la metodología de investigación será de tipo exploratoria, ya que existen muy pocos estudios respecto al tema en nuestro país. Y a su vez descriptiva ya que describe y analiza los temas ampliamente. La investigación presenta un enfoque cuantitativo ya que se recopilarán datos y se analizarán para poder determinar cursos de acción en el futuro. A su vez tiene un enfoque

cualitativo ya que se utilizaran medios como entrevistas, revistas, cuestionarios y diversos tipos de fuentes de recopilación de datos.

## **CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO**

### **1.2. Fuentes de generación de energía**

Se definen dos grupos en los cuales se pueden clasificar las energías que están presentes en nuestro planeta y a las cuales la humanidad puede utilizar para producir electricidad, estas son las energías renovables y las no renovables (Tirapegui, 2006).

Dentro de estas dos categorías se pueden definir las siguientes características y tipos de formas diferentes de generación, éstas son:

- Las energías renovables: son fuentes naturales que pueden ser renovadas constantemente por acción de la propia naturaleza, es decir que no se agotan. Entre estas se encuentra la energía del sol y la del viento. También se encuentra en desarrollo la energía geo-térmica que aprovecha el calor que emana desde el interior de la tierra. Dentro de esta categoría se cuenta la energía hidroeléctrica que es utilizada ampliamente en la actualidad.
- Las energías no renovables: están presentes en cantidades limitadas y debido a su uso se agotan (Roca & Sacalet, 2008). Estas no pueden ser regeneradas por la naturaleza por lo tanto una vez utilizadas no se pueden volver a ocupar. Las más

utilizadas son las que provienen de la quema de combustibles fósiles, como el petróleo, carbón y gas natural.

### **1.3. Energías renovables**

Las energías renovables deben su nombre a que son inagotables en el tiempo (Ministerio de energía, 2015), pueden ser reutilizables y sus características las convierten en un suministro constante, aunque dependiendo del tipo puedan presentar intermitencias en la continuidad del suministro, pero trabajando de forma adecuada y con buenos estudios representa la forma de generación eléctrica más barata y perdurable en el tiempo. Existe una tendencia mundial hacia este tipo de energías ya que son inagotables, limpias y permite evitar la dependencia hacia los combustibles fósiles (Sachs, 2012).

Las principales fuentes de energía renovables son:

- Energía por biomasa
- Energía eólica
- Energía solar
- Energía mareomotriz
- Energía hidráulica
- Energía geo-térmica

La historia humana en su larga historia ha dependido de los sistemas renovables como la fuerza de los animales, fuerza del mismo humano y utilizando el sol como protector así como fuente para obtener luz y energía.

#### **1.4. Energías no renovables**

Las energías no renovables según el mundo científico (Puig & Corominas, 1990) se refiere al tipo de fuente que son extraídas de la naturaleza en una cantidad limitada, de forma una vez totalmente consumida no es capaz de regenerarse por sí misma, además por su composición se encuentran en diferentes partes del mundo y su extracción puede resultar complicada y costosa. Debido a esto es posible que algunas fuentes de estos tipos de energía nunca sean explotados ya que por mantener pequeñas cantidades resulta económicamente inviable. Los principales combustibles utilizados en el mundo son:

- Carbón
- Gas natural
- Petróleo

Estos combustibles son los más utilizados actualmente para generar energía en el mundo, de primera forma térmica, luego mecánica y finalmente eléctrica. Desde la revolución industrial se comenzó con la quema de carbón para impulsar la

maquinas a vapor, más tarde con la invención del motor de combustión interna se utilizó el petróleo y sus derivados.

En términos de abundancia el tipo de combustible más abundante en el mundo es el carbón (PETROQUÍMICA, 2015), la energía se obtiene mediante la quema lo que libera energía calórica que finalmente mediante procesos isotérmicos es convertida en electricidad. El gas natural es el más limpio y también provoca los menores efectos negativos sobre la salud y efecto invernadero pero su extracción es más costosa y peligrosa. El más utilizado actualmente es el petróleo ya que la mayoría de las maquinas del mundo utilizan motores a combustión interna, además del mismo se extraen derivados que son polímeros con usos industriales, militares y científicos (Herradón, 2014). Por lo cual además de permitir la generación de electricidad también forma parte de nuestro mundo actual y del desarrollo de la humanidad. El principal problema es que el uso de estos elementos produce cambios en el ambiente global además de presentar un importante reto de extracción ya que las reservas más accesibles están siendo agotadas debido al aumento constante en su demanda. Por otro parte al estar concentrados en solo algunos países sus precios están afectos a diferentes factores como políticos, culturales entre otros, que afectan la oferta y demanda internacional.

## **1.5. Energía nuclear**

La energía nuclear obtiene su potencia mediante la reacción química de pequeñas cantidades de combustible, este se denomina uranio y es explotado en varios países del mundo (TWENERGY, 2012). Además existen reservas suficientes para abastecer al mundo por más de cien años, por lo cual resulta una opción tangible para el escenario mundial que se presenta. También carece de emisiones de efecto invernadero y sin duda es la que ha alcanzado mayores desarrollos durante los últimos años debido al avance de la física y química.

## **1.6. Energía nuclear en hechos históricos**

El mundo siempre se ha maravillado con los descubrimientos científicos que cada vez liberan más la mente y permiten resolver preguntas que antes parecían imposibles. El uranio fue descubierto por Martin Klaproth<sup>1</sup> en 1789 y desde entonces ha sido una atracción constante en el estudio de la física. Con el descubrimiento de la radiactividad, en 1896 por Henri Becquerel<sup>2</sup>, es que las mesas de estudios científicos en el mundo han presentado diversas utilidades para el bienestar de la humanidad tanto medicinales, como energéticas y otras en la industria militar. Durante 1930 un científico llamado Enrico Fermi<sup>3</sup> bombardeó con neutrones alrededor de 60 elementos químicos, en los cuales se encontraba

---

<sup>1</sup> Martin Heinrich Klaproth, 1743-1817, químico alemán descubridor del uranio entre otros elementos.

<sup>2</sup> Antoine Henri Becquerel, 1852-1908, físico francés descubridor de la radiactividad. Ganador del premio Nobel de física en 1903.

<sup>3</sup> Enrico Fermi, 1901-1954, físico italiano desarrollador del primer reactor nuclear además de ser un gran contribuyente a la teoría cuántica y física de partículas. Ganador del Nobel de física en 1938.

el uranio 235, y de estas se produjo las primeras reacciones nucleares creadas por la mano del hombre, específicamente fisión nuclear<sup>4</sup>. Durante la segunda guerra mundial se construye el primer reactor nuclear con fines bélicos que más tarde derivaría en la construcción de la bomba de destrucción masiva lanzada sobre Japón y que pondría término a la segunda guerra mundial y con ello abrir el debate sobre este tipo de energía. Durante los años 1940 en adelante se propuso la construcción de reactores con la intención de generación energética, en sus primeras etapas se consideraron para suplir los motores de combustión interna que poseían los submarinos. Con el avance en el manejo de la termodinámica se generaron nuevos logros en la construcción de reactores y esto dio paso a la incursión de reactores para generar electricidad de forma comercial.

En el año 1986 el reactor número cuatro de la central Chernóbil (Energía nuclear, 2015), Ucrania, sufre la fusión de su núcleo desencadenando uno de los mayores desastres ecológicos y sanitarios de toda la historia del mundo, en donde la política y malas decisiones impulsadas por la guerra fría llevaron a científicos a cometer errores y causando la muerte de cientos de personas así como enfermedades y mutaciones en muchas otras con efectos que se tienen hasta el día de hoy. Durante 2011 un terremoto en Japón causo que un reactor de dicha central se saliera de control lo cual derivo en la evacuación de la ciudad de Fukushima<sup>5</sup> con la consecuencia actual de que cientos de familias no podrán

---

<sup>4</sup> Ver anexo 1 “Fisión Nuclear”

<sup>5</sup> Ver anexo 2 “ Accidente central Fukushima”

volver a sus hogares. Debido a la conmoción internacional y la entrada de energías renovables y de una fuerte lucha progresista por combatir el calentamiento global muchos países entre ellos Suiza, Bélgica y Alemania (Revista EI, 2014) a proponer cerrar sus plantas nucleares y cambiar a las energías verdes o renovables. Sin embargo existen países que por su rápida industrialización y crecimiento demográfico, económico social obliga al extremo consumo energético, para esto la quema de combustibles fósiles se acrecentó y por el mismo motivo países como Corea del Sur, India, Rusia y China proponen la construcción de nuevas centrales (Brocate, 2010). Aproximadamente para el año 2015 la producción mundial de petróleo se espera de 94 millones de barriles al día (EMOL, 2015), lo que equivale a unas 4.500 millones de toneladas al año, a su vez el gas natural en 3.100 millones de toneladas, por lo cual las emisiones de CO<sub>2</sub> han aumentado drásticamente intensificando el efecto invernadero y el cambio climático.

### **1.7. La energía nuclear en el mundo**

En este momento existen 437 reactores operativos en el mundo en control civil en 31 países, además existen 70 en construcción. En conjunto generan aproximadamente el 11% de la electricidad del mundo como suministro continuo (World Nuclear Association, 2015). El mayor aumento está concentrado mayoritariamente en el continente asiático, lo ha comunicado la Agencia Internacional de Energía Atómica (AIEA). Según datos podría existir un aumento

en el consumo mundial de entre un 35% a 100% para el año 2030. En la actualidad la generación por parte de la energía nuclear es de 375.000 MWe de capacidad total instalada. Actualmente dieciséis países dependen de la energía nuclear en su matriz energética, EE.UU, Reino Unido, España, Rumania y Rusia poseen una quinta parte de su suministro por este medio, Corea del Sur y Bulgaria alrededor del 30%, Bélgica, República Checa, Finlandia, Hungría, Eslovenia, Suecia, Suiza, Eslovaquia y Ucrania casi un tercio, mientras que Francia casi tres cuartas partes.

### **1.8. La economía de la energía nuclear**

En el actual sistema global en donde las economías importan y exportan todos los días, parece lógico pensar en cómo afectara el desempeño operacional de una posible planta nuclear en Chile. Es conocido el hecho que la dependencia hacia los combustibles fósiles ha provocado contaminación en todo el globo, no solo afectando a la zona en cuestión, si no que con efectos que pueden ser apreciados en diferentes partes del planeta. Según expertos como James Lovelock<sup>6</sup>, “No hay alternativa más sensible que la energía nuclear si queremos realmente sustentar nuestra civilización”. En un mundo donde el crecimiento demográfico está llevando a naciones como China e India a un crecimiento sostenido y la población mundial alcanza los 6.5 billones de personas pareciera importante aliviar la miseria

---

<sup>6</sup> James Lovelock, 26 de Julio 1919, Doctor, Químico, escritor, meteorólogo, ambientalista y científico de la NASA. Contrario al armamentismo nuclear, pero promotor del uso pacífico y energético de la misma para evitar uso masivo de combustibles fósiles.

humana y poder crear condiciones necesarias para que la humanidad alcance un crecientito igualitario y desarrollado. En la mayoría de las naciones este impulso energético satisface las necesidades a corto plazo, pero carece de un plan que pueda integrar a los 9 billones de personas que se estiman serán las que habiten el planeta dentro de 50 años (Henríquez, 2008).

Unas de las implicancias en el desarrollo económico de los países del tercer mundo hace hincapié en el desarrollo del bio combustibles como una forma de aumentar sus ingresos, como el caso de Brasil, donde las cosechas de maíz, trigo, caña de azúcar, aceite de palma entre otros, presenta la generación de etanol que puede suplir al petróleo en motor diésel para que este funcione. Sin embargo en un momento dado el gobierno que este de turno se verá en la encrucijada de aumentar los ingresos del país o dejar de alimentar a su población.

### **1.9. Competitividad de la energía nuclear**

La energía nuclear es un forma de generación que es competitiva en comparación a sus pares que utilizan energías convencionales para generar electricidad, aun cuando su entrada en funcionamiento sea un costo en capital elevado y los gastos por operación y mantenimiento agreguen un valor negativo para la inversión. También cabe destacar que los beneficios sociales que trae a economías emergentes como la Chilena son sobresalientes y que permitirán generar una serie de cambios a nuestro mercado eléctrico así como al concepto tecnológico

que fomentara el estudio de nuevos profesionales, nuevas fuentes de trabajo y diversificara nuestra matriz energética. Dentro de los principales costos de una central de este tipo, está el combustible utilizado, que se presenta en forma natural y al igual que los combustibles fósiles debe ser extraído y procesado para su funcionamiento en un reactor. Al ser extraído el Uranio está presente en una proporción de 99.3% de Uranio<sup>7</sup> U<sup>238</sup> y 0.7% de Uranio U<sup>235</sup>. Para poder ser utilizado en un reactor este debe ser enriquecido a una proporción que va entre el 2% al 5%, esto considera un valor agregado que hace aumentar los costos de operación y mantenimiento. El costo de generar electricidad mediante esta forma se ha mantenido en un rango estable durante los últimos 15 años, sin embargo existe un aumento en la inversión debido a las mejoras en seguridad y las tecnologías nuevas que se aplican en la construcción de las centrales, a esto se suma el hecho de que la duración promedio en el levantamiento de la central es de 8 a 10 años. La elección o no de la construcción de la planta dependerá de la balanza de pagos que tenga el país inversor y como este presente su economía en el mercado mundial (Bittán, 2011), es de gran importancia incentivar la inversión extranjera o de capitales que permitan el desarrollo de tecnologías, esto al igual que países desarrollados se logra mediante el subsidio del estado y asegurando concesiones que permitan que privados puedan manejar estos sistemas complejos con un apoyo constante del estado.

---

<sup>7</sup> Ver anexo 3 “ Enriquecimiento del Uranio”

## **CAPÍTULO II: LA EVOLUCIÓN DE LA ENERGÍA NUCLEAR EN CHILE**

### **2.1. Hechos históricos**

Aunque en el mundo existe un avance constante en las mejoras tecnológicas relacionadas con las energías, es cierto que Chile no desarrolla grandes avances en estas materias y solo se ha limitado a la firma de acuerdos internacionales en materia de cooperación e integración.

Sin embargo, en 1964 el Doctor Cruz-Coke<sup>8</sup> realiza la primera incursión en el tema de la energía nuclear. Esto luego de que Estados Unidos publicara información sobre la energía nuclear y el futuro prometedor que se acercaba. Propuso que el senado impulsara la creación de una institución que regulara los temas relacionados con este tipo de energía, lo que generó que alrededor de diez años más tarde se fundara la comisión nacional de energía (CNEN), de la cual el Doctor Cruz-Coke sería su primer presidente.

En primera instancia se enviaron oficiales y científicos a estudiar la tecnología, avances y mejoras que se presentaban en otros países. Durante 1959 Chile se unió a la Comisión interamericana de energía nuclear (CIEN), la cual buscaba la cooperación entre países y el uso pacífico de la energía nuclear. Durante este mismo año se firmó un acuerdo con Estados Unidos para prestar soporte en las futuras investigaciones. También se firmó el tratado antártico que prohíbe

---

<sup>8</sup> Eduardo Cruz-Coke Lassabe 1899-1974, médico, político y candidato presidencial a la república de Chile. Impulsor de leyes importantes en materia de salud y pionero en tema nuclear en Chile.

explosiones del tipo nuclear en la Antártica, así como el almacenamiento de residuos nucleares. Durante 1960, Chile ingresa como miembro al Organismo internacional de Energía Atómica (OIEA). En 1962 comienzan los primeros entrenamientos en radioisótopos para uso clínico. Para 1963 se firma el tratado para la prohibición de ensayos en la atmosfera terrestre. (IPRLTDA, 2016)

En 1966 se dona a la Universidad de Chile por parte de la Universidad de California un ciclotrón<sup>9</sup>, resultando fundamental para la investigación y formación de físicos nacionales con conocimientos nucleares. Durante el mismo año se crea el centro de estudios nucleares de La Reina, Santiago de Chile. Para esta fecha ya existían alrededor de 120 profesionales estudiando y desarrollando aspectos nucleares como medicina, física, bioquímica, veterinaria, fisiología, entre otras.

Durante 1970 se terminó el primer edificio dedicado al estudio de la energía nuclear en La Reina, en el cual se habilitaron los primeros laboratorios para estudios relacionados con la industria de la agricultura e hidrología.

En 1972 en conjunto con España se firma el acuerdo para la colaboración en la investigación de energía nuclear con fines pacíficos. Con la firma de este acuerdo se iniciaron los trabajos para el centro de estudios nucleares de Lo Aguirre. Un año más tarde, 1973 se crea el centro de estudios nucleares del ejército (CENE). En 1974 se inicia el servicio de radio medicina del CCHEN.

---

<sup>9</sup> Ciclotrón: Acelerador de partículas experimental.

Desde 1983 se trabajaba sobre nuevos laboratorios de análisis de uranio por conteo de neutrones retardados, difracción de rayos x y fluorescencia por rayos x. en Mayo de 1984 se promulga la ley de seguridad nuclear.

Durante el año 1985 se firmó el protocolo con la República Popular de China, para la cooperación en los usos pacíficos de la energía nuclear. A su vez en el año 1994 se suscribió en la ciudad de Viena la convención de seguridad nuclear<sup>10</sup>. En 1995 Chile forma parte del tratado de no proliferación nuclear, y en 2011 firmo con Estados Unidos un acuerdo para la cooperación sobre energía nuclear.

## **2.2. Estudios realizados**

A través de diferentes décadas se han realizado estudios sobre la posibilidad de incorporar una central del tipo nuclear en Chile, sin embargo esta posibilidad ha sido descartada principalmente por la falta de información y debido a la gran inversión inicial que esto significa. El primer estudio se llevó a cabo en 1970, dando paso a una posterior evaluación en 1997, en ambos casos se descartó debido a la evaluación económica. Aunque el costo promedio puede ser competitivo en el tiempo, la inversión inicial y la falta de profesionales en el área

---

<sup>10</sup> Convención de Viena 1994: El 17 de junio de 1994, representantes de 84 países aprobaron sin votación el texto de la "Convención sobre Seguridad Nuclear". La medida fue adoptada en el marco de una conferencia diplomática convocada por el director general con la autorización de la junta de gobernadores del OIEA, que se celebró del 14 al 17 de junio de 1994 en la sede del organismo en Viena.

La convención constituye el primer instrumento jurídico de carácter internacional que aborda de modo directo la cuestión de la seguridad de las centrales nucleares.

llevo a una incertidumbre sobre las posibles alzas en las tasas de interés que podrían representar un factor de riesgo considerable en caso de una eventual inversión.

En marzo de 2007, la presidenta de la república, Michelle Bachelet, oficializo la creación de un equipo de trabajo, más conocido como la comisión Zanelli<sup>11</sup>, (Zanelli, 2007) al cual se le encomendó realizar todos los estudios pertinentes en el área para determinar las posibilidades reales de construcción de una central nuclear en el país. De esta comisión surgieron las siguientes conclusiones sobre la posible generación:

- Es una energía segura para personas y bienes públicos. Es más segura que cualquier otro tipo de generación eléctrica.
- Es económicamente competitiva y también evita la dependencia de factores externos, como son las vulnerabilidades propias del sistema eléctrico y dependencia de combustibles fósiles.
- Tiene costos comparables a los del carbón y su precio no es de alto impacto con el precio final del [kW] generado.
- Es compatible y amigable con el medio ambiente, genera muy bajas emisiones de efecto invernadero.

---

<sup>11</sup> Jorge Zanelli: Doctor en Física, En febrero del 2007 la Presidenta de la República Michelle Bachelet, le encargó presidir una comisión compuesta por diez profesionales para estudiar la viabilidad de la generación eléctrica en base a energía nuclear en Chile.

- Las condiciones sísmicas del país, no representan un problema que no pueda ser superado.
- Los desechos presentan un desafío logístico, pero existe la tecnología para manejarlos y no representa un pasivo ambiental inaceptable.

Luego e esta comisión se concluyó que no se podía descartar la generación nucleoelectrica y se derivaron en nuevos estudios que se llevaron a cabo en años posteriores.

En el año 2010 el ministro de energía Marcelo Tokman, en el seminario internacional sobre posibilidades, brechas y desafíos, presento las proyecciones en materia de energía donde existía la voluntad de incorporar la energía nuclear hacia el año 2030, pero que no existían las condiciones de seguridad requeridas por los estándares internacionales.

Durante el 2010 el gobierno de Sebastián Piñera, firmo una acuerdo de colaboración con Estados Unidos, haciendo énfasis en la investigación y realizar una preparación de profesionales que serían la base para impulsar los programas futuros. Por otro lado el colegio de ingenieros realizo una propuesta sobre tres sitios posibles donde existiría la posibilidad técnica de instalar una futura central, a esta propuesta se le denomino con el nombre de "Desarrollo de Centrales Nucleares en Chile 2009-2030", que estudia los aspectos técnicos para poder

considerar una eventual construcción de una central nuclear en el país. Por parte del programa se realizó un cronograma donde se presentan los puntos relevantes en orden de tiempo.

### **2.3. Opinión ciudadana**

Para el año recién pasado un proyecto de generación eléctrica más conocido como Hidroaysén, vio cómo se generaron masivas protestas ciudadanas debido a la instalación de un sistema de transmisión y generación en la Patagonia de Chile. De esta forma el rechazo ciudadano fue cada vez en aumento con participación de varios sectores políticos, asociaciones ecologistas y el público en general. De esta forma que antes de comenzar con estudios y pre proyectos de factibilidad es importante conocer cuál es el nivel de conocimiento de la población y si existe una disposición social para la instalación de un central de este tipo.

La energía nuclear presenta un caso complejo de aceptación por parte de la población, esto principalmente por los desastres ecológicos que han quedado en la conciencia de las personas, desinformación, asociación con armas de destrucción masiva, etc. La mayoría de las centrales nucleares no solo afecta al sistema eléctrico nacional, si no que ha su vez presenta un cambio social, económico, político, ecológico y demográfico, y presenta variadas oportunidades desde el punto de vista de generación de trabajo indirecto que suelen integrarse en las cercanías de las instalaciones.

En Chile la energía nuclear genera cierto rechazo debido a que históricamente se han generado grandes terremotos, lo cual presentaría un riesgo que estaría constantemente asechando la estabilidad estructural de la central. Esto según encuestas realizadas por el diario La Tercera durante los años 2006, 2010 y 2011, en donde la de 2006 de un total de 401 personas entre las edades de 18 y 70 años, de diferentes localidades concluyo que el 55% de los encuestados está de acuerdo con la construcción de plantas nucleares en el país, el 61% considera que esta energía ayudaría a diversificar la matriz energética y el 51% cree que la energía nuclear es contaminante y más peligrosa que otras formas de generación. En 2009 se realizó una encuesta a 1500 personas encargada por el ministerio de energía, donde el 67% rechaza una planta nuclear, pero un 74% aceptaría la construcción bajo ciertas condiciones. La mayor parte de rechazo se ubicó en los segmentos de ingresos más bajos, y el sector ABC1 enfatizó con una mayor aprobación. La principal conclusión que se le da a este estudio fue la falta de información que presenta la ciudadanía respecto al tema energético en el cual según el ministro de la época, existía un desafío para que la ciudadanía cuente con la mayor información posible sobre los alcances e implicancias de las fuentes de energía (Marticorena, 2010). Durante el año 2011, el rechazo aumento al 60%, esto debido a la crisis que presento Japón luego del terremoto del 11 de marzo del mismo año, pese a estas cifras 47% de los encuestados señalo que el gobierno debería profundizar los estudios en materia de energía nuclear antes de tomar una decisión.

Las principales razones del rechazo son la sismicidad del país, con un 42%, desacuerdo con la real opción de independencia energética, con 60%, un 80% la considera peligrosa, comparada con otras formas de generación y 50% considera que es potencial para la generación de armamento bélico (La Tercera , 2011).

## 2.4. Matriz energética actual

En Chile debido a su naturaleza geográfica es que el uso del agua para la generación eléctrica ha tenido una participación importante, desde los años sesenta presentaba un promedio de 65%. En la década de los ochenta es valor aumento hasta el 80% y durante la última década este valor promedia el 30 a 40%, esto dependiendo de la concentración de lluvias y como los embalses mantienen una cuota mínima para su funcionamiento.

Para el año 2015 existe una capacidad total instalada de 20.375 MW, la cual se divide principalmente entre dos grandes grupos el sistema interconectado del norte grande (SING) y el sistema interconectado central (SIC), el primero con un 21.54% y el segundo con un 77,7%. Además existen dos sistemas menores para las zonas australes del país, con el sistema eléctrico de Magallanes con 102 MW de potencia instalada y el sistema eléctrico de Aysén con 52 MW. También existen otros pequeños sistemas que no conforman parte de este estudio por ser menores en cuanto a potencia y por estar aislados de los sistemas principales<sup>1213</sup>.

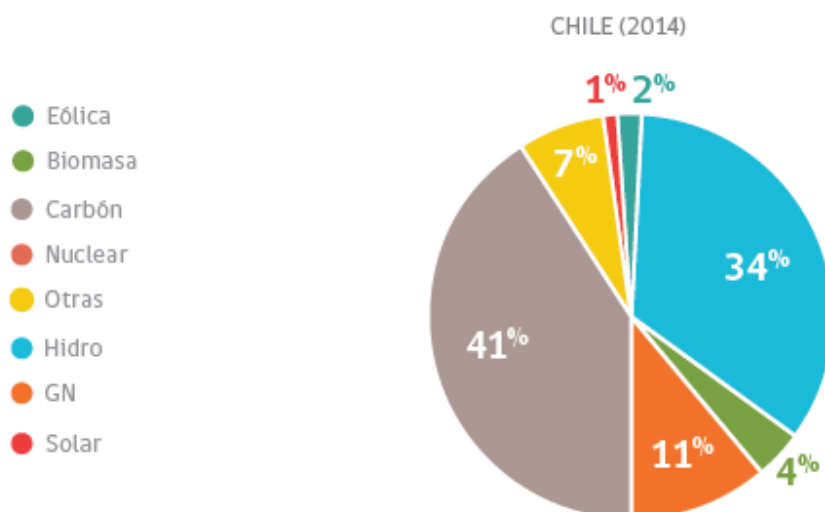
---

<sup>12</sup> Sistemas medianos de Los Lagos, Cochamó y Hornopirén.

<sup>13</sup> Sistemas Aislados de Isla de Pascua y San Pedro de Atacama.

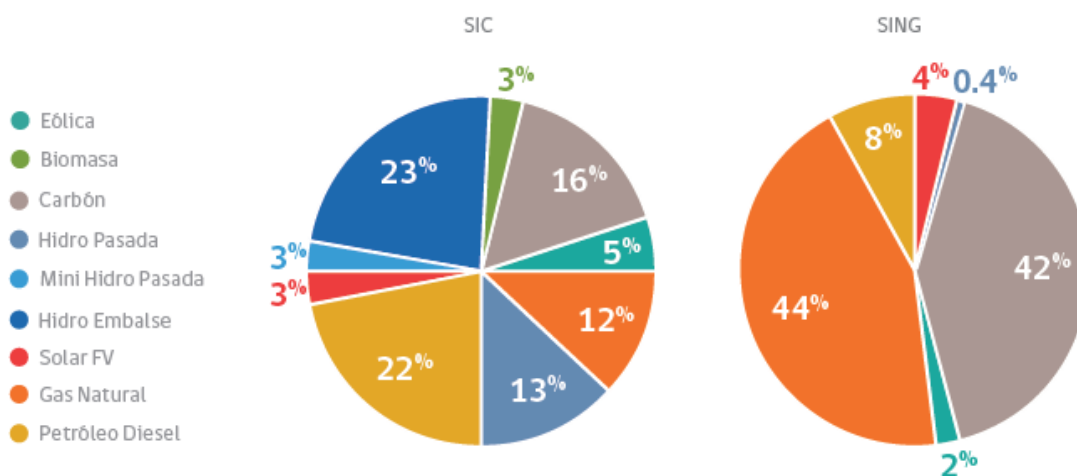
En promedio para los años 2010 a 2014 la generación del SING fue de 16.530 GWh, con un 98% de producción en base a energía termoeléctrica con un valor menor hidroeléctrico que no alcanza el 1%. Par el SIC la generación total fue de 48.207 GWh, con una contribución del 43% hídrica y un 52% termoeléctrica, esto es la mezcla entre energía a base de carbón, gas natural y diésel. También existe un 5% que se produce en base a energías renovables, biomasa, solar y eólica (Ministerio de energía, 2015).

**Figura 2.1 Generación eléctrica en Chile**



Fuente: IEA, Ministerio de Energía

**Figura 2 Capacidad instalada SIC y SING**



Fuente: Energía 2050 Política energética de Chile

Durante la última década se ha producido un aumento en las energías renovables, para el año 2005 se contaba con 286 MW de potencia instalada, preferentemente en plantas solares, de bio masa, mini hidráulicas y eólicas, lo cual ha tenido un aumento sostenido alcanzando a la fecha 2.269 MW formando parte del 11.41% de la capacidad eléctrica total del país y produciendo cerca del 10% de la generación actual.

## **2.5. Reactores en funcionamiento**

Durante el gobierno de Jorge Alessandri en 1964 fue creada la comisión nacional de energía nuclear, que posteriormente en 1965 bajo la ley N°16.319 fue creada la comisión Chilena de energía nuclear. Los principales objetivos son la atención a problemáticas desarrolladas en las diferentes áreas de uso al interior de país de elementos radioactivos, en los cuales se asesora la adquisición, transporte y desuso de estos materiales. También se encarga del desarrollo y la investigación en materia de salud, áreas industriales y planes futuros para el uso futuro de la energía nuclear en Chile.

La CCHEN mantiene una sede ubicada en Santiago donde se dirige administrativamente y para su operación cuenta con dos centros para estudios nucleares, La Reina y Lo Aguirre.

### **2.5.1. Reactor Experimental Chileno (RECH-1)**

Ubicado en la Reina el reactor RECH-1 entro en funcionamiento en el año 1974, con una potencia de 5 MW, es utilizado en estudios así como en la producción de radioisótopos para uso médico. También realiza irradiaciones para muestras geológicas y para efectuar análisis químicos que permiten determinar la antigüedad de ciertos elementos. Para su funcionamiento utiliza combustible nuclear de uranio empobrecido, esto es un 80% de  $U^{238}$  y 20% de  $U^{235}$ , lo cual significa que en caso de sufrir el robo o que se tratara de implementar usos para material bélico resultaría imposible.

La forma del tratamiento de residuos es mediante almacenamiento y en ningún caso son derivados al medioambiente. A su vez dentro del laboratorio no se generan aguas residuales ni desechos de gases ni sólidos y los únicos materiales que han debido ser renovados como el combustible nuclear fueron enviados a EE.UU en un programa cuyo objetivo era reducir la proliferación de armas nucleares.

**Figura 3 Reactor nuclear RECH-1, La Reina**



Fuente: CCHEN

### **2.5.2. Reactor Experimental Chileno (RECH-2)**

Este reactor se encuentra ubicado en Lo Aguirre y comenzó su ciclo de operación en el año 1977, posteriormente se mantuvo en una etapa de pausa, para en 1989 operar nuevamente hasta junio de 1993. Desde ese entonces solo desarrollo pruebas menores y para inspecciones de rutina. Su último día de funcionamiento fue el 10 de junio de 1999, para el 2010 retirar el total de su combustible nuclear y enviarlo a EE.UU, por lo cual el reactor al día de hoy solo permanece con agua desmineralizada no radiactiva y no genera ningún tipo de residuo (CCHEN, 2015).

## **2.6. Disposición política para implementación**

Desde una mirada de estado es que se crea la comisión chilena de energía nuclear creada por ley el año 1965 bajo la ley N° 16.319 y modificada el año 2010. Dentro de las principales funciones que la CCHEN mantiene son la de asesorar al gobierno de turno en todos los asuntos que estén relacionados con la energía nuclear. Mantener informados acerca de tratados y leyes internacionales, elaborar y proponer planes futuros sobre investigación y desarrollo, ejecutar planes previstos, fomentar la investigación y desarrollo en diversas áreas de la ciencia así como colaborar con el servicio de salud sobre la prevención de riesgos inherentes a la energía atómica. Para conocer más en profundidad estos temas es importante analizar el cronograma en cuanto a las políticas que ha implementado el estado para la decisión sobre avanzar en el ámbito nuclear. En el año 2007 Jorge Zanelli entrega informe de opción nuclear a la presidenta Michelle Bachelet, en donde se realiza una investigación sobre la energía nuclear en el mundo y como sería su implementación en el país. Se crea el grupo de trabajo en núcleo electricidad GTNE, el cual presenta “La opción nucleoelectrónica en Chile” Durante el 2010 el ministro de energía Marcelo Tokman crea el grupo consultivo nuclear GCN. Para el año 2010 se entrega el informe llamado “Núcleo electricidad en Chile: Posibilidades, brechas y desafíos”. Durante el mismo año Sebastián Piñera asume como presidente, en donde el debate nuclear se congela, esto debido al terremoto y posterior maremoto que azotó Japón durante el 2011.

Según las diferentes reseñas y entrevistas, el evento de Fukushima fue una excusa que interfirió de manera negativa en la exploración de la energía nuclear en el país (La Tercera, 2015). Por su parte René Muga<sup>14</sup>, comparte que la política que se ha establecido a nivel país y de largo plazo “Energía 2050”<sup>15</sup> debe estudiar todas las formas posibles de generación y que deben ser evaluadas, esto previniendo que el consumo eléctrico del país desarrollara un aumento al doble en los próximos 15 años, lo que supondría la incorporación de 700 MW adicionales por año de energía.

Por parte de la CCHEN, existen tres licitaciones en carpeta para analizar las condiciones geo-gráficas, medioambientales y humanas, así como el estudio de los diferentes tipos de reactores y por último diseñar un plan de información pública para concientizar a la población.

---

<sup>14</sup> René Muga: Vicepresidente ejecutivo de la Asociación Gremial de generadoras de Chile y parte del comité consultivo de “Energía 2050”

<sup>15</sup> Energía 2050: Política energética estimada para la generación hasta el año 2050.

## **CAPÍTULO III: ANÁLISIS DE LA GENERACIÓN ELÉCTRICA MEDIANTE ENERGÍA NUCLEAR EN CHILE Y SU IMPACTO EN LA ECONOMÍA NACIONAL**

La energía nuclear se ha utilizado durante muchos años para generar energía para diferentes usos tanto militares como civiles. Esta se caracteriza por ser limpia y por ser amigable con el ambiente ya que no requiere grandes espacios para su emplazamiento y no genera gases de efecto invernadero. Para un país como Chile permitirá desarrollar tecnología que generara beneficios para las futuras generaciones, así como también mantener una matriz energética más estable y diversificada que pueda hacer frente hacia los desafíos que se presentaran en los nuevos años, tomando como énfasis el crecimiento que ha mantenido el país en las últimas décadas. La energía nuclear puede desarrollarse de diferentes maneras, para la generación eléctrica que permita la inyección de energía al sistema nacional se pueden identificar algunas propuestas que son factibles para los escenarios actuales.

### **3.1 Tipos de reactores nucleares**

Un reactor nuclear constituye una instalación industrial donde se aprovecha la energía liberada por la fisión nuclear que genera energía térmica y es utilizada para producir vapor y mover una turbina acoplada a un generador eléctrico que después producirá electricidad que será inyectada a la red eléctrica para su consumo. Las partes fundamentales de todo reactor de fisión son las siguientes:

- **Combustible nuclear:** El principal combustible que se utiliza para los reactores comerciales utiliza uranio natural, el cual naturalmente se encuentra dividido en dos isotopos en su mayoría, el isotopo  $U^{238}$  con una concentración del 99.3% y el isotopo  $U^{235}$  en un 0.7%. Para poder utilizarlo y alcanzar una mejor división al momento de la fisión es que el uranio se enriquece, lo que significa aumentar la proporción del isotopo  $U^{235}$  al 2% y 5% dependiendo del reactor en el que se vaya a utilizar.
- **Moderador:** Debido a la que la reacción nuclear que se lleva a cabo dentro del reactor produce neutrones de muy alta velocidad, estos deben ralentizarse para poder alcanzar la reacción en cadena<sup>16</sup>, por lo cual se utilizan elementos que permitan limitar la velocidad de los neutrones, estos pueden ser agua liviana, agua pesada, grafito, entre otros.
- **Barras de control:** Constituyen un elemento de protección en caso de que el reactor presente fisiones más allá de lo controlable, con lo cual se busca frenar la reacción nuclear mediante la inserción de barras que poseen materiales químicos que absorben la mayoría de neutrones liberados con lo cual la reacción en cadena no puede llevarse a cabo y esto mantiene el núcleo del reactor en control.

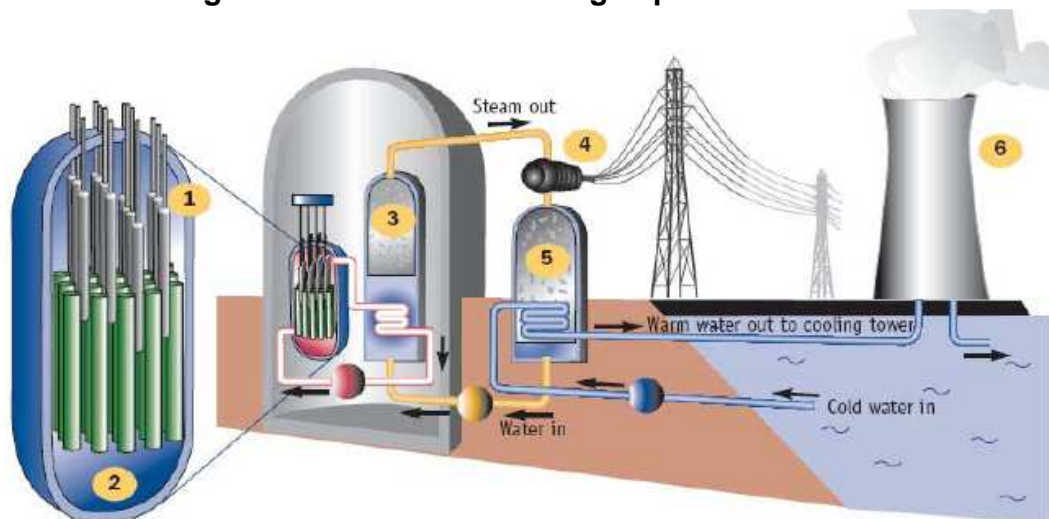
---

<sup>16</sup> Reacción en cadena: En anexos

- Elementos para mantener la seguridad: Las centrales mantienen elementos dispuestos para minimizar los errores de construcción así como errores típicas del material, para esto se incluyen una serie de sensores, refrigerantes barras de control, protocolos de seguridad procedimientos de trabajos, normas y capacitaciones que permiten al personal trabajar de forma segura.

Para el modelo de estudio se define una central típica para ejemplificar sus partes y ubicación dentro de una planta nuclear.

**Figura 4 Planta nuclear de agua presurizada**



Fuente: CCHEN

1. Barras de control
2. Combustible nuclear en diminutas capsulas llamadas pellet

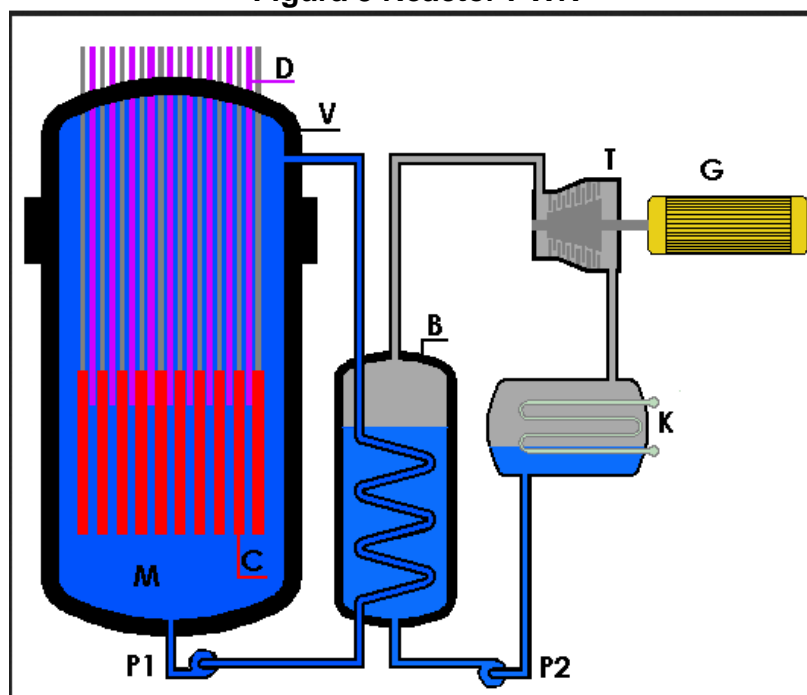
3. Generador de Vapor
4. Turbina
5. Condensador
6. Torre de refrigeración

### **3.2 Reactor PWR**

El reactor PWR es del tipo de agua a presión, ya que utiliza el agua como refrigerante y moderador. Se divide en tres circuitos, el primario se encuentra presurizado con la finalidad que el agua alcance su estado de ebullición. Es el reactor más utilizado en el mundo abarcando cerca de 230 en su uso comercial civil y militar. Su capacidad de generación va entre los 900 y los 1500 MW. Además debido a su forma de funcionamiento no contamina aguas ya que los circuitos funcionan de forma independiente en la cual no existe contacto entre sus fluidos. Dentro de sus ventajas se encuentra que este tipo de reactores son más estables debido a que pueden reducir su potencia en caso de la posibilidad de entrar en una reacción en cadena descontrolada, esto debido a las barras de control que se encuentran por sobre el nivel de funcionamiento y pueden dejarse caer por acción de la gravedad en caso de una pérdida en las medidas de seguridad. A su vez el hecho de utilizar uranio enriquecido permite el uso de agua normal como moderador en comparación al agua pesada que debe ser procesada y su valor es más costoso. Las desventajas son que para mantener el agua sin que llegue al punto de ebullición es necesario manejar el reactor a muy altas

presiones lo cual genera fuerzas con un sobreesfuerzo en toda la red de cañerías así como el recipiente que mantiene el combustible nuclear. También la mezcla de agua caliente con ácido bórico producto de la corrosión en las barras de control afecta la vida útil del reactor y de las cañerías de acero inoxidable, tendiendo a tener que efectuar mantenciones que dejan el reactor fuera de servicio (Rothwell, 2008).

Figura 5 Reactor PWR

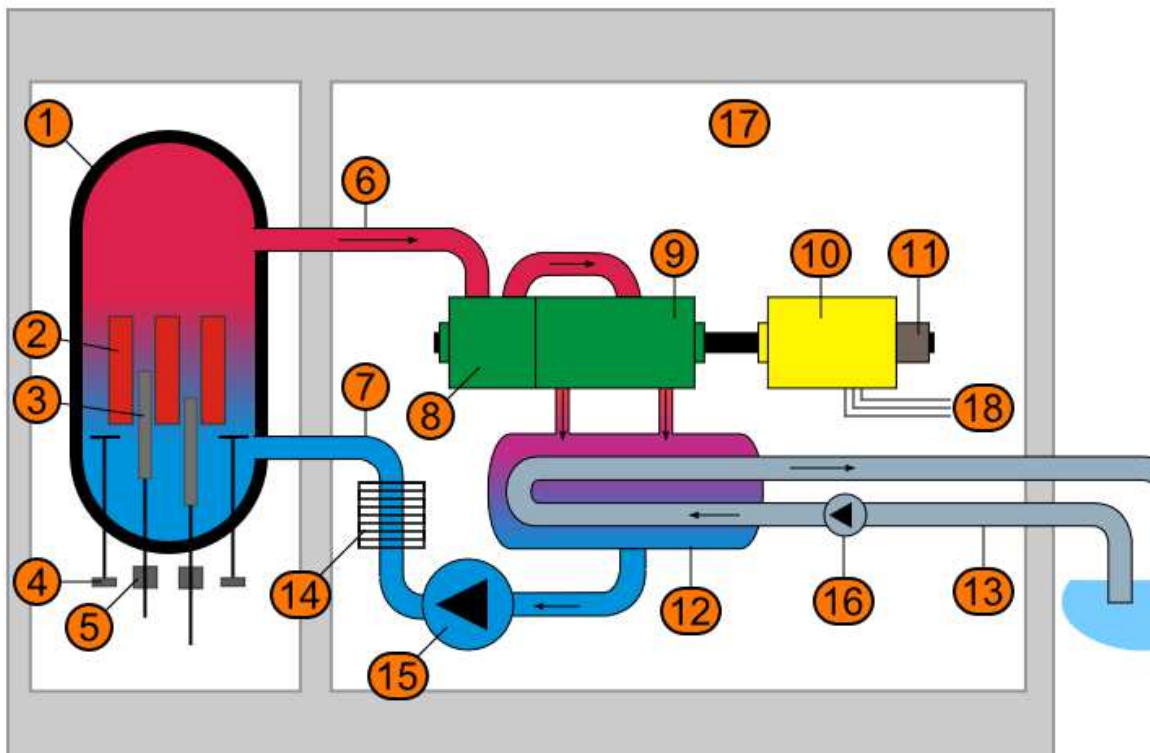


Fuente: Nukeworker - PWR

### 3.3 Reactor BWR

El reactor BWR, es un tipo de reactor nuclear conocido como agua en ebullición, el cual fue desarrollado por General Electric durante los años cincuenta, a diferencia de otros modelos utiliza el agua común como moderador y refrigerante, la cual mediante la temperatura que se alcanza en el núcleo genera vapor el cual se utiliza para impulsar una turbina que esta adosada a un generador eléctrico.

Figura 6 Reactor BWR



Fuente: Nukeworker - PWR

Para su funcionamiento se utiliza alrededor de 140 toneladas de uranio, esto es un reactor promedio, ya que la cantidad total de combustible dependerá de la

potencia que sea capaz de generar. Su construcción se desarrolla con la hipótesis que las medidas de seguridad nunca sean menores que la capacidad máxima de presión que pueda soportar o que los refrigerantes posean una menor cantidad de elementos, esto pensando que ante cualquier eventualidad no se produzcan daños al combustible o a los diferentes componentes.

### **3.4 Combustible nuclear**

El principal combustible utilizado en los reactores a nivel mundial es el uranio, este se obtiene producto de la explotación de minas, posterior a esto el material se purifica tratándolo químicamente para producir  $U_3O_8$ . Este producto se convierte luego en hexafluoruro de uranio  $UF_6$ , el cual es un material que a temperatura ambiente es sólido pero que puede alcanzar el estado gaseoso si la temperatura se eleva por sobre el punto de ebullición.

Posterior comienza la etapa de enriquecimiento, el isótopo del uranio  $U^{235}$  es más ligero que el  $U^{238}$ , con esta propiedad es que se utilizan dos métodos para aumentar la cantidad del isótopo  $U^{235}$ . La primera realiza una separación centrífuga, es decir que el  $UF_6$  se mueve dentro de una centrifuga donde al tener distintos pesos van separándose en diferentes proporciones (Vergara, 2011). La segunda es gracias a una difusión gaseosa donde el  $UF_6$  al pasar por barreras con diferente porosidad puede acumularse con mayor facilidad y de esta manera enriquecerse.

La fabricación final del combustible para el reactor se lleva a cabo mediante la conversión del  $UF_6$  en polvo de dióxido de uranio  $UO_2$ , el cual se calienta hasta alcanzar una temperatura de alrededor de los 1400 °C con lo cual se comprime y forma pequeños pellets que son insertados en tuberías de zirconio o acero inoxidable. Esto constituye la barra que finalmente será insertada en el reactor.

### **3.5 Competitividad de la energía nuclear**

Durante el pasado siglo la energía nuclear atrajo la atención de varios países que buscaban una forma innovadora de nuevas formas de conseguir energía, por este motivo muchos científicos mediante investigación lograron dar con la forma de convertir esta poderosa energía en algo útil para la humanidad. Esta energía siempre será causa de debate, debido a las muchas implicancias medio ambientales que han tenido lugar a lo largo de la historia. Sin embargo la energía nuclear ofrece ciertas ventajas en contra de sus semejantes, esto debido a la gran capacidad que ofrece en cuanto a producción de energía constante.

Los costos asociados a la implementación de una central nuclear se dividen en tres grandes grupos, el costo de capital, costos de operación y mantenimiento y costo de combustible. El costo de capital es el de mayor impacto ya que toma parte de cerca del 60% a 70% del costo total de inversión requerido para la instalación de dicha planta (Gonzales de Ubieta, 2009), esto se considera que la vida útil de una central puede durar hasta los 50 años con las mejoras

tecnológicas y cambios en el combustible que valla requiriendo. A su vez la implementación trae consigo el gran desafío que se considera en la infraestructura necesaria y todos los costos asociados a ingeniería que deberá desarrollar a los largo de su instalación.

Hoy en día los costos de mantenimiento y operación pueden superar ampliamente al valor por combustible, ya que debido a la gran cantidad de siniestros ocurridos es que las medidas de control y seguridad han encarecido su funcionamiento, esto en contra del precio del uranio que en las últimas décadas ha visto una disminución en su precio debido a los nuevos yacimientos y a las mejoras en explotación que la minería ha logrado.

Una de las ventajas de la energía nuclear es que no depende de las grandes fluctuaciones que sufren los combustibles fósiles, petróleo, gas o carbón, aun cuando el capital inicial para la implementación de una planta termoeléctrica son menores, el valor por producción de KWh es menor con el uso del uranio.

También la energía nuclear permite aumentar la competitividad en las tarifas eléctricas, un ejemplo de esto es Francia donde el 75% de su electricidad es generada por plantas de este tipo y en donde las tarifas eléctricas domiciliarias son un 22% más baratas que el resto de Europa (Energía y Sociedad).

## **3.6 Marco legal**

### **3.6.1. Marco eléctrico**

En Chile el mercado eléctrico se rige principalmente por dos leyes, el DFL N°1 “Ley general de servicios eléctricos” y el reglamento de la ley de servicios eléctricos D.S.N° 327.

Se considera que toda empresa eléctrica que inyecte energía y potencia al sistema eléctrico, como también toda empresa que utilice energía y potencia, está haciendo uso de las instalaciones que forman parte del sistema de transmisión troncal y de los de sub transmisión.

Según la ley corta 19.940, se define quienes son los responsables de cancelar los costos o peajes de transmisión dependiendo el tamaño de la central generadora.

Estarán exceptuadas de pago las inferiores a 9 MW.

Pagarán una proporción del pago total de proporcionalidad a su capacidad las que se encuentren entre 9 y 20 MW.

Deberán cancelar el pago total de los peajes por uso del sistema troncal todas las centrales que tengan una potencia superior a 20 MW.

La ley 200018 conocida como ley corta II, establece un sistema de licitación al que se deben ajustar las empresas que sean concesionarias de los servicios públicos

de distribución eléctrica, para estas se establece un precio tope para las ofertas que estén en proceso de licitación. Para las licitaciones se establece la base que las ofertas como valor máximo no puede superar el precio nudo que esté vigente, solo se podrá incrementar en un 20%, cuando dicha licitación quede sin oferentes se podrá aumentar en un 15%. Además la ley obliga a que los precios en el largo plazo se regulen en el caso que exista una variación acumulada del 10%.

### **3.6.2. Marco Nuclear**

Para el caso de Chile, no existe una política profunda sobre el manejo de la energía nuclear solo existe la referencia de las leyes y normativas que utiliza la CCHEN. La ley 16.319 creada en 1965 definió y creo la CCHEN, a su vez define a la energía nuclear o atómica la que es generada debido a los procesos o fenómenos nucleares. Esta puede ser mediante fisión o fusión nuclear, así como también la emisión de particular y de diferentes tipos de radiaciones. La ley 18.302 define la seguridad nuclear otorgando atribuciones a la CCHEN de fiscalizar, así como contempla la autoridad de regular principios y funcionamientos, lineamientos, acerca de seguridad en materia de energía nuclear, determinar las infracciones a las normas legales aplicadas a reglamentos sobre seguridad y protección nuclear y de las responsabilidades civiles por daños en materia de energía nuclear.

### **3.6.3. Marco Ambiental**

En la ley Chilena N°19.300 sobre las bases generales del medio ambiente así como otros instrumentos se establece las exigencias con el medio ambiente para todos los proyectos u actividades que puedan causar algún tipo de impacto ambiental, según esta ley todos los proyectos de generación eléctrica que superen los 3 MW deberán presentar un sistema de evaluación de impacto ambiental así como someterse a evaluación por impacto a reactores y establecimientos nucleares. Durante la evaluación se consideran los siguientes puntos:

1. Descripción del proyecto en conjunto con las actividades que se desarrollaran.
2. Definición de los efectos, circunstancias y alcances que darán origen a la necesidad de realizar un estudio de impacto ambiental según el artículo 11 de la ley.
3. Realizar una evaluación para definir predicciones sobre el impacto ambiental del proyecto, incluyendo todas las situaciones de riesgo que se pudiesen tener.
4. Medidas que se podrán adoptar para minimizar el efecto de situaciones de riesgo o eliminarlas en donde sea posible.
5. Un plan detallado para poder realizar el seguimiento a las medidas y variables ambientales que sean relevantes.
6. Definir un plan donde se dé cumplimiento a toda la legislación ambiental.

### **3.7 Uso de la energía en Chile**

En Chile el consumo de la energía en general se basa en cinco grandes áreas, comercial, público y residencial, industrial, minero y transporte. El mayor consumidor de energía fue el sector minero junto con el industrial alcanzando ambos un promedio del 40% al año 2014 (Ministerio de energía, 2015). El sector industrial consume cerca del 24% y el 16% restante a minería y la energía consumida preferentemente se debe a tres fuentes, biomasa 20%, diésel 26% y electricidad 33%. El transporte es el segundo consumir con un 33% y su mayoría de energía consumida proviene en un 99% del diésel y gasolina. El restante 21% se consumió en el sector público y residencial así como comercial, en estas áreas la energía que más se consume es la electricidad con un 34%, seguida de la biomasa la cual es en su mayoría leña con un 32%. A su vez el gas licuado con un 18% y el gas natural con un 11%.

Como resultado final los grupos más grandes de consumos de energía son los que derivan del petróleo, diésel y gasolina con un 56%, electricidad con un 22% y biomasa 15%.

Para un país como Chile que importa el 90% del combustible fósil que utiliza, resulta considerable realizar estudios sobre como poder mantener una independencia para evitar la dependencia hacia los mercados extranjeros y no permitir que la volatilidad afecte la economía del país.

## **3.8 Mejoramiento mercado eléctrico**

### **3.8.1. Efectos de la incorporación de la Energía Nuclear en la Matriz Chilena**

En las condiciones óptimas de funcionamiento una planta nuclear puede mantener la mayoría de sus reactores en operación, lo cual significa un suministro constante de energía a la matriz energética. En nuestro país el organismo encargado del despacho de energía al sistema es el CDEC<sup>17</sup>, el cual determina la entrada de las centrales que producen energía a un menor costo. Esta coordinación debe desarrollarse pensando en cuál es el tiempo estimado para que sus generadores puedan generar y estar operativos, esto dependerá del tipo de energía que se utilice para generar el movimiento del mismo. En una producción termina el tiempo puede variar desde un par de horas hasta alrededor de seis, a su vez la energía eólica dependerá siempre del factor viento que puede no estar presente en todo momento. Para el caso solar solo durante el día podrá suministrarse un flujo constante, ya que caída la noche no es posible con la tecnología actual almacenar energía con esta envergadura. De esta manera la central nuclear permitirá tener un factor de planta cercano al 99%, lo que permitirá hacer frente ante situaciones en donde las fuentes alternativas o convencionales no lo permitan.

---

<sup>17</sup> **CDEC:** Centro de despacho económico de carga: Organismo que es el encargado de coordinar la operación del sistema eléctrico donde cohabitan cuatro tipos de usuarios: generadoras, transmisoras, distribuidoras y grandes consumidores industriales, como las mineras

### **3.8.2. Venta de excedentes**

En la actualidad se está desarrollando la carretera eléctrica que permitirá mediante la unión Cardones-Polpaico realizar la interconexión del SIC con el SING, lo que permitirá disminuir las tarifas así como un mejoramiento en la eficiencia energética que permitirá a las generadoras vender su exente a las grandes empresas del norte. A su vez como política de estado se ha comprometido la unión con miembros del SINEA<sup>18</sup> para el año 2035, lo que permitirá vender energía a Ecuador, Perú y Colombia. También asegura una calidad y continuidad del suministro ya que si existen una mayor cantidad de centrales en operación permitirá que ante eventualidades puedan ser suplidas con otras alternativas, en este punto es donde la energía nuclear se vuelve más competitiva, porque al tener un flujo constante de operación podrá vender durante un tiempo superior a sus competidoras y a más compradores y necesidades en conjunto con países conectados a la red.

### **3.9 Mirada macroeconómica**

Desde la mirada actual de los precios internacionales al año 2017 (Datos Macro, 2017) que presenta el barril de petróleo y la volatilidad con la que se han presentado estos valores en las últimas décadas, es que las cuentas nacionales se han visto afectadas. Para el tercer trimestre del 2017 las importaciones de

---

<sup>18</sup> **SINEA:** Sistema de Interconexión Eléctrica Andina, con Chile, Colombia, Ecuador y Perú.

bienes intermedios tuvieron un aumento del 1.3% con respecto al 2016, esto se debió principalmente al alza que tuvo en los precios que alcanzo un 3.2%, debido mayormente a productos energéticos, principalmente a la subida en los precios del petróleo y carbón mineral (Banco Central, 2017). A su vez durante el tercer trimestre de 2017 se presentó un déficit en la cuenta corriente por US\$ 1.507 millones, 2.2% del PIB, además se mantiene un déficit acumulado durante los últimos cuatro trimestres del 1.7% del PIB. Esto se debe en gran medida al saldo negativo de la renta US 2.763 millones. Por parte de la balanza comercial se presentó un superávit de US\$ 1.720 millones, esto explicado por las exportaciones debido al aumento en el precio del cobre. La cuenta financiera reflejó un endeudamiento con el resto del mundo por US\$ 2.597 millones, donde principalmente los recursos fueron recibidos por empresas de energía, gas y agua. La cuenta financiera aumento en US\$ 701 millones en aportes en capital destinados en gran medida a empresas de energía.

### **3.9.1. Políticas públicas futuras**

Como políticas públicas se presentó por parte del gobierno en el año 2014 una agenda energética con diferentes alcances en la materia hasta el año 2050, estableciendo tareas para diseñar y ejecutar una política en energía que asociara diferentes aspectos sociales, políticos y técnicos. En primera instancia se busca establecer los términos, estándares, políticas y regulaciones que generen una

garantía de factibilidad técnica y sustentabilidad de la matriz energética. Para desarrollar estos planes se establecen los siguientes criterios:

- Generar una visión confiable, sostenible, inclusiva y competitiva.
- Sustentarse en seguridad y calidad de suministro, impulsar la energía como el motor del desarrollo, mantener la compatibilidad con el medio ambiente y educación energética.
- Que al año 2035 se mantenga una interconexión de Chile con los países del continente sudamericano.
- Que ninguna región al año 2050 tenga más de una hora perdida de suministro por más de una hora sin considerar una fuerza mayor.
- Posicionar a Chile entre los tres países miembros de la OCDE que tengan los menores precios de suministro eléctrico a nivel residencial como industrial.

Para alcanzar estos desafíos es que se han propuesto metas para el 2050 estas son las siguientes:

- Mantener el acceso universal y equitativo a toda la población a los servicios energéticos y que sean modernos y confiables, disponible para todas las familias.
- Unificar la significancia de la pobreza energética para establecer políticas.
- Estandarizar el confort térmico y lumínico reduciendo la relación entre ingreso y gasto energético de las familias que son más vulnerables.

### **3.9.2. Situación con el estado como inversor**

Para esta situación el estado realiza la inversión en capital para la construcción de la central, así como las políticas públicas y de infraestructura necesarias para la puesta en marcha, como posteriormente la operación y mantención.

La mayoría de los países que se iniciaron con programas nucleares para el ámbito civil comenzaron con la inversión por parte del estado como ente constructor, operador y mantenedor de las mismas. El caso más destacable es Francia donde a través de la empresa estatal Electricité de France, aún mantiene el control de las plantas, aunque mantiene ciertas autonomías en la administración y criterios comerciales como una empresa privada. El reino unido por su parte desde los años noventa privatizó los reactores del tipo Magnox, ya que su operación y mantenimiento tenían condiciones peligrosas para la empresa privada. En América México y Argentina mantienen bajo su propiedad las centrales nucleares en funcionamiento. En Canadá y Suiza ciertas centrales forman parte del estado y otras son traspasadas con el tiempo a organizaciones privadas para que sean administradas.

La ventaja económica más sobresaliente para el estado es el acceso a mejores formas de financiamiento con tasas de interés más bajas para la puesta en marcha de la central, esto en vista del riesgo político y financiero que considera este tipo de inversiones. Para un país que no posee experiencia y en forma de

disminuir el riesgo de no pago, además el valor de una central de 1000 MW es alrededor de dos mil millones de dólares. Por lo cual el hecho que el estado tiene un acceso más sencillo a las garantías e implicancias políticas da una mejor cobertura para que el programa llegue a concretarse.

Un hipotético beneficio es que al no existir lucro por parte del estado, las tarifas eléctricas serían menores para las familias, sin embargo este beneficio requeriría de subsidios fiscales, para el caso Chileno las empresas estatales funcionan con criterios comerciales y con regulación tarifaria donde los subsidios se otorgan en función con la pobreza de la población.

Otro beneficio sería mejorar la imagen del estado y la aceptación pública, en países donde el gobierno y el estado mantienen una alta credibilidad la decisión de impulsar la energía nuclear podría verse como un impulso positivo para el país. Por el contrario el caso mexicano considera que la población no está de acuerdo con los estándares de seguridad que mantiene el estado con la central de Laguna Verde, y que el estado debería retirar todas sus futuras políticas nucleares debido al riesgo que esto conlleva.

En contraparte uno de los inconvenientes que presenta la situación estatal es la menor eficiencia en la operación, esto definido por la falta de criterio entre los lineamientos políticos del estado como ente propietario y regulador. A su vez condicionada por criterios políticos podría incurrir en gastos innecesarios o una

sobredotación de trabajadores lo que aumentaría los costos de explotación (Universidad Adolfo Ibáñez, 2008).

Las ventajas y desventajas de que el estado se haga parte como inversor inicial depende tanto de factores nacionales como internacionales, pero en algunos países el traspaso posterior a privados ha logrado ser una opción acorde al país, ya que establece las bases regulatorias y operativas, así como eliminar la falta de interés inicial de los inversionistas ya que con el tiempo el marco regulatorio y los diversos riesgos se ven disminuidos, dando cabida a los privados de encontrar un real negocio.

### **3.9.3. Situación con el Inversión privada**

En el caso privado las inversiones son realizadas en el momento que se considera que el proyecto obtendrá una rentabilidad positiva, el momento será definido siempre que el estado permita la incorporación de nuevas fuentes de energía, a su vez establece la legislación necesaria para tales efectos. Para el caso Chileno, podría operar de manera similar en cómo se efectúan las inversiones el día de hoy en materia energética, adicionalmente tendrían las nuevas inversiones someterse al marco legal y ambiental correspondiente.

La opción privada permitiría que la sociedad captar beneficios como la operatividad y calidad de suministro, además este modelo tiene la ventaja de que

es consistente con el modelo energético actual en donde se están uniendo los grandes sistemas eléctricos del país. Además existen operando en el país empresas privadas que en otros países ya poseen experiencia en la administración de centrales nucleares por lo cual la experiencia podría ser implementada en Chile, en contra parte con la nula experiencia que mantiene el estado en temas nucleoelectrónicos. El único país del mundo en los casos estudiados pertenece a Estados Unidos <sup>19</sup> . Otros países como España comenzaron siendo modelos privados, pero con el paso de los años se convirtió en mixto, donde existen centrales de administración estatales y otras privadas. En la práctica para los países que no poseen lineamientos ni políticas energéticas de este tipo resulta complicado de iniciar una inversión privada en el corto plazo, esto debido a la burocracia que generarían las nuevas políticas y regulaciones necesarias para la implementación, a su vez pueden existir por parte del mismo país otros negocios que sean rentables y que desvíen la atención de los inversionistas privados.

En el ámbito internacional Chile no mantendría ningún problema de aceptación de la comunidad internacional, ya que mantiene sus relaciones internacionales con una diplomacia seria y mercados fuertes. También está la opinión internacional de mal utilización de los residuos nucleares en la proliferación de armas de

---

<sup>19</sup> Sin embargo la agencia Federal Valle de Tennessee (TVA) es propietaria de centrales nucleares, lo cual convierte al modelo estadounidense en más bien un modelo mixto.

destrucción masiva, sin embargo la política Chilena a lo largo de la historia en materia armamentística no ha sido de agresión.

### **3.10 Mejoramiento de la balanza de pagos**

Según las necesidades de cada país es que la energía nuclear puede afectar su matriz energética, durante la reunión de 2013 en San Petersburgo diferentes naciones debatieron sobre el futuro de esta energía (Krakowiak, 2013). Argentina decidió avanzar en la construcción de nuevas centrales nucleares para de esta manera incrementar en un 18% su matriz nuclear actual. Estados Unidos considera que durante los últimos 20 años su matriz fue soportada en un 20% gracias a esta energía, y que se está trabajando para revitalizar la industria nuclear y desarrollar nuevas plantas nucleares más limpias y seguras. Canadá por su parte renovó un reactor en la central de Bruce Power donde se trabaja con ocho unidades, a su vez se programó la construcción de dos nuevos reactores. Francia con cerca del 75% de la generación por medios nucleares decidió aumentar la seguridad y los compromisos que mantienen en todos los aspectos ambientales con los demás miembros. China por su parte mantuvo en revisión la construcción de centrales nuevas, pero desde 2012 aprobó un nuevo plan en seguridad nuclear y se espera la construcción de 28 reactores dentro de la siguiente década. Rusia es uno de los países más activos en materia energética y centro su compromiso en permitir la expansión de su tecnología a otros países en Asia y América Latina. Japón por su parte determinó el cierre de la central de

Fukushima por partes considera una revisión total de las políticas energéticas para el año 2030. India que actualmente mantiene 20 reactores confirmó que seguirá en estudios para la implementación de nuevas centrales ya que constituyen un elemento esencial de su matriz. Corea del Sur detalló que su compromiso es con el uso pacífico de la energía nuclear como una fuente sustentable y segura, en donde a la fecha mantiene un 30% de generación nuclear y para el 2024 se espera la construcción de nuevos reactores. Brasil posee cerca del 3% de generación nuclear y está construyendo una planta que entrara en funcionamiento el 2018, además considera una oportunidad para el desarrollo de investigación y desarrollo.

Otros países consideran que sus actuales plantas han permitido hacer frente a la dependencia exclusiva del petróleo y afrontar sus variaciones en el tiempo, así como permitir planificar políticas fiscales en el largo plazo. Según (Folgado, 2013)<sup>20</sup>, “necesitamos la energía nuclear como respirar”, haciendo énfasis en el escenario económico vivido por España, y que gracias a sus plantas nucleares pudo hacer frente a los cortes de gas desde Argelia y la exportación de energía a países cercanos permitió aliviar la cuenta corriente en dicho país frente a su situación actual. Durante 2013 la energía nuclear aportó 2781 M€ al PIB de España, lo que representa el 0.27% del PIB nacional, además generó un aumento

---

<sup>20</sup> José Folgado, doctor en Ciencias Económicas por la Universidad Autónoma de Madrid fue durante 16 años director del Departamento de Economía de la patronal CEOE.

en la tasa de empleos, ya que se emplearon 27.466 personas, en donde el 81% contrajo un contrato indefinido (Efe Verde, 2015) .

## CONCLUSIONES

Dado el creciente aumento de la población en el mundo, así como el mayor consumo por parte de la industria es que resulta imperativo el estudio de nuevas formas de energía que puedan impulsar el crecimiento del país, en donde según las expectativas al año 2050 indican que se deberá contar con una matriz energética diversificada y que pueda mantener la continuidad del suministros. Esto busca satisfacer las necesidades de las organizaciones y buscando el bienestar social, para esto el estado de Chile se encuentra modelando los lineamientos para la eficiencia energética, enfocado en la población para dar cumplimiento a estándares OCDE sobre calidad lumínica y de calefacción.

Durante los últimos años se ha impulsado el uso de energías renovables como son la solar y eólica generando nuevas centrales a los largo de todo el país, a su vez se ha impulsado la unión del sistema SIC y SING que son los más grandes del país, esto con la finalidad de aprovechar mejor la energía en tiempos de escases hídrica así como fortalecer el consumo en la gran minería.

Para Chile la implementación nuclear es poco factible en el corto plazo, esto se debe en primera instancia en la imagen negativa que tiene la población en general debido al desconocimiento que refiere a los grandes desastres que han ocurrió, Chernóbil y Fukushima, además se mantiene una falta de conocimiento con lo que

a seguridad nuclear se refiere, ya que no existen más registros sobre eventualidades negativas en otras plantas nucleares a lo largo de la historia, por lo cual si se analizan los motivos de falla de Chernóbil se logra entender que en plena guerra fría la seguridad y conocimiento de los científicos no fue atendida con lo que por fallas políticas se desencadenó una catástrofe. Para el caso de la central Fukushima se entiende que se sucedieron una serie de acontecimientos que llevaron a la falla del reactor, y aun cuando Japón es el país con mejores estándares en seguridad en el mundo, se vieron sobrepasados por el terremoto y posterior maremoto que asoló sus costas. Para esta planta se mantenía tecnología que ya es obsoleta a los estándares de construcción actuales, donde los nuevos reactores están diseñados para que en caso de catástrofe natural sean desconectados de forma automática sin depender de la electricidad o sistemas externos. De esta manera el problema de seguridad no sería un impedimento para la construcción de una central en el país.

Por otro lado diversificar la matriz energética en Chile permitirá tener mejor calidad de suministro, un tiempo de uptime superior, así como hacer frente a los momentos en los cuales la dependencia a la generación de combustibles fósiles y escases hídrica puedan dejar al país en un estado de racionamiento. Como plan futuro la mayoría de los vehículos serán eléctricos lo cual demandará una gran cantidad de energía, esto podría ser una realidad al año 2050, tiempo suficiente para lograr una legislación acorde a la generación nuclear como la construcción y operación de las primeras centrales en Chile.

Por parte del estado no ha existido una voluntad real de implementar la núcleo electricidad, ya que existe el rechazo por parte de la población, llevando a manifestaciones que disminuyen la aprobación política del gobierno de turno, aun cuando durante la década pasada se llevaron a cabo numerosos estudios por instituciones educaciones y organizaciones en general, dando como positiva la factibilidad de la implementación en el país. Además la generación de nuevos puestos de trabajo, la mejora en investigación y desarrollo, abrir nuevas fronteras de estudio en las universidades tanto del estado como privadas, son factores positivos a la hora de declarar una posición y cerrar la puerta de forma inmediata tomando solo encuentra el impacto al medio ambiente.

El país mejoraría su balanza comercial ya que permite hacer frente a la volatilidad que presenta el petróleo, que ha tenido variaciones a los largo de la última década, así como impulsar este excedente de energía en otras formas de utilización como son la calefacción que mayoritariamente son a leña, que producen emisiones toxicas y desforestan los bosques. Si la política fuera utilizar la electricidad en ámbitos como calefacción se generará una espiral en la economía que será beneficioso para toda la población. Por una parte disminuiría la tasa de desempleo, aumentaría los ingresos de las familias beneficiando el consumo de más bienes y servicios que podrían ser para mejorar la calidad de vida, por ende mejora el beneficio social. Por otro lado ayudaría a disminuir la importación de combustibles que en Chile es cerca del 95%, permitiendo un superávit en la cuenta corriente beneficiado por las ventas de cobre, molibdeno y

litio en el futuro, gracias a que esta revolución permitiría disminuir los costos de explotación y con ello aumentar la utilidad, con esto se podría obtener un superávit aun en tiempos donde el precio internacional de los minerales descienda. También mejorara los sueldos reales ya que a mayor tecnología, mayor será la formación y capacidad de los profesionales, con lo que el ingreso deberá ser mayor.

## BIBLIOGRAFIA

- (19 de Marzo de 2011). *La Tercera* . Obtenido de <http://diario.latercera.com/2011/03/19/01/contenido/negocios/10-62882-9-el-60-de-chilenos-no-acepta-bajo-ninguna-condicion-tener-centrales-nucleares.shtml>
- André, F., & Castro, L. (211). *Revista ICE*. Recuperado el 12 de Noviembre de 2015, de [http://www.revistasice.com/CachePDF/CICE\\_83\\_\\_\\_810091ECBB9FFCF682FDfE12C77FAB6D.pdf](http://www.revistasice.com/CachePDF/CICE_83___810091ECBB9FFCF682FDfE12C77FAB6D.pdf)
- Bittán, M. (24 de Marzo de 2011). Energía nuclear: Economía y sociedad. *America Económica*. Recuperado el 06 de Diciembre de 2015, de <http://www.americaeconomia.com/analisis-opinion/energia-nuclear-economia-y-sociedad>
- Brocate, R. (2010). *El renacimiento asiático de la energía nuclear*. Universidad Complutense de Madrid. Recuperado el 15 de Noviembre de 2015, de [https://www.google.cl/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=5&ved=0ahUKEwjyooLP4rHJAhWQPJAKHWfmBJwQFgg0MAQ&url=http%3A%2F%2Fdialnet.unirioja.es%2Fdescarga%2Farticulo%2F3745509.pdf&usg=AFQjCNHb6sM7Oo\\_QoacmsfYs2ORK3TbMzQ&bv m=bv.108194040,d.Y2l&cad=rja](https://www.google.cl/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=5&ved=0ahUKEwjyooLP4rHJAhWQPJAKHWfmBJwQFgg0MAQ&url=http%3A%2F%2Fdialnet.unirioja.es%2Fdescarga%2Farticulo%2F3745509.pdf&usg=AFQjCNHb6sM7Oo_QoacmsfYs2ORK3TbMzQ&bv m=bv.108194040,d.Y2l&cad=rja)
- CCHEN. (Noviembre de 2015). ¿Que es la CCHEN? Santiago de Chile, Chile. Recuperado el 19 de Septiembre de 2017
- EMOL. (13 de Noviembre de 2015). AIE registra una reserva récord de tres mil millones de barriles de petróleo. Recuperado el 15 de Noviembre de 2015, de <http://www.emol.com/noticias/Economia/2015/11/13/759010/AIE-registra-una-reserva-record-de-tres-mil-millones-de-barriles-de-petroleo.html>

- Energía nuclear. (10 de Julio de 2015). *Energía Nuclear*. Recuperado el 16 de Noviembre de 2015, de <http://energia-nuclear.net/accidentes-nucleares/chernobyl>
- Energía y Sociedad. (s.f.). La energía nuclear es una tecnología clave en la transición hacia un sistema energético sostenible. Recuperado el 20 de Septiembre de 2017, de <http://www.energiaysociedad.es/boletin/la-energia-nuclear-es-una-tecnologia-clave-en-la-transicion-hacia-sistema-energetico-sostenible/>
- Folgado, J. (28 de Noviembre de 2013). Dependencia energética y electrificación de la economía. *El nuevo lunes*, págs. 1-3.
- Francescutti, P. (Enero de 2008). La guerra de las corrientes. *REE*, 59. Recuperado el 20 de Noviembre de 2015, de [http://www.ree.es/sala\\_prensa/ext\\_img/entrelneas-0007\\_5.pdf](http://www.ree.es/sala_prensa/ext_img/entrelneas-0007_5.pdf)
- Gonzales de Ubieta, A. (01 de Noviembre de 2009). La competitividad de la energía nuclear. Recuperado el 20 de Septiembre de 2017, de <https://www.revistavirtualpro.com/biblioteca/la-competitividad-de-la-energia-nuclear>
- Henríquez, S. (Enero de 2008). Obtenido de <http://www.pntl.co.uk/2013/04/importancia-de-la-energia-nuclear-en-la-economia-global/>
- Herradón, B. (30 de Abril de 2014). *Educación Química*. Obtenido de <https://educacionquimica.wordpress.com/2014/04/30/algunas-aplicaciones-de-los-polimeros/>
- IPRLTDA. (08 de Enero de 2016). Obtenido de Intituto de protección radiologica: <http://www.iprltda.cl/noticias/energia-nuclear-en-chile/?month=feb&yr=2015>
- La Tercera. (25 de Febrero de 2015). ¿Que pasó con la opción de energía nuclear en Chile? *La Tercera*, pág. 55.
- Marticorena, J. (18 de Julio de 2010). Encuesta: 67% rechaza una planta nuclear. *La Tercera*. Recuperado el 09 de 01 de 2016, de [http://www.latercera.com/contenido/655\\_277168\\_9.shtml](http://www.latercera.com/contenido/655_277168_9.shtml)

- Ministerio de energía. (12 de Noviembre de 2015). *minergía.cl*. Obtenido de [http://antiguo.minenergia.cl/minwww/opencms/14\\_portal\\_informacion/la\\_energia/ernc.html](http://antiguo.minenergia.cl/minwww/opencms/14_portal_informacion/la_energia/ernc.html)
- Ministerio de energía. (2015). *Política energética de Chile, Energía 2050*. Santiago de Chile: Gobierno de Chile. Recuperado el 15 de Septiembre de 2017, de [http://www.energia.gob.cl/sites/default/files/energia\\_2050\\_-\\_politica\\_energetica\\_de\\_chile.pdf](http://www.energia.gob.cl/sites/default/files/energia_2050_-_politica_energetica_de_chile.pdf)
- ONGAWA. (2013). *Sin energía no hay desarrollo*. Recuperado el 11 de Noviembre de 2015, de [http://www.ongawa.org/wp-content/uploads/2013/07/Informaci%C3%B3n-b%C3%A1sica-Energ%C3%ADa-desarrollo\\_jul2013.pdf](http://www.ongawa.org/wp-content/uploads/2013/07/Informaci%C3%B3n-b%C3%A1sica-Energ%C3%ADa-desarrollo_jul2013.pdf)
- PETROQUÍMICA. (23 de Septiembre de 2015). *Petroquímica*. Recuperado el 18 de Noviembre de 2015, de <http://revistapetroquimica.com/en-siete-anos-el-carbon-sera-el-combustible-fosil-mas-usado-del-mundo/>
- Puig, J., & Corominas, J. (1990). *La Ruta de la energía*. Barcelona: Antropos. Recuperado el 15 de Noviembre de 2015, de <https://books.google.cl/books?id=GMRZlZUfxGkC&pg=PA204&hl=es#v=onepage&q&f=false>
- Revista EI. (2014 de Septiembre de 2014). La costosa apuesta alemana por energía verde. Recuperado el 15 de Noviembre de 2015, de <http://www.revistaei.cl/2014/09/02/la-costosa-apuesta-alemana-por-energia-verde/>
- Roca, J., & Sacalet, S. (2008). *Agotamiento de los combustibles fósiles y emisiones de co2*. Universidad de Barcelona. Recuperado el 20 de Noviembre de 2015, de <http://pendientedemigracion.ucm.es/info/ec/jec12/archivos/A7ECONOMIA%20ECOLOGICA%20Y%20MEDIO%20AMBIENTE/ORAL/ROCA%20JUSMET/ROCA%20JUSMET.pdf>
- Rothwell, G. (2008). *Energía nuclear en Chile, Los costos y beneficios de la opción de construir una central nuclear en 2020*. Santiago: CEPCHILE. Recuperado el 19 de Septiembre de 2017, de

[https://www.cepchile.cl/cep/site/artic/20160304/asocfile/20160304094732/r112\\_grothwell\\_EnergiaNuclear.pdf](https://www.cepchile.cl/cep/site/artic/20160304/asocfile/20160304094732/r112_grothwell_EnergiaNuclear.pdf)

Sachs, J. (29 de Julio de 2012). *La Nacion*. Recuperado el 14 de Noviembre de 2015, de <http://www.lanacion.com.ar/1494182-el-uso-de-combustibles-fosiles-amenaza-al-planeta>

San Juan, P. (19 de Agosto de 2015). *La Tercera*. Recuperado el 13 de Noviembre de 2015, de <http://www.latercera.com/noticia/negocios/2015/08/655-643648-9-enap-precio-de-las-bencinas-subira-hasta-53-por-litro-y-completara-13-semanas-de.shtml>

Tirapegui, W. J. (2006). *Introducción a las energías renovables no convencionales*. ENDESA, Santiago de Chile. Recuperado el 12 de Noviembre de 2015, de <http://www.endesa.cl/ES/NUESTROCOMPROMISO/PUBLICACION/ESEINFORMES/Documents/Libro%20ERNC%20versi%C3%B3n%20de%20imprensa.pdf>

TWENERGY. (01 de Febrero de 2012). *twenergy.com*. Obtenido de <http://twenergy.com/a/que-es-la-energia-nuclear-384>

Vergara, C. (2011). *Supervision.cl*. Obtenido de CODELCO comienza a producir uranio en forma experimental en mina Radomiro Tomic: [http://www.supervision.cl/prontus\\_supervisores/site/artic/20110304/pags/20110304104953.html](http://www.supervision.cl/prontus_supervisores/site/artic/20110304/pags/20110304104953.html)

World Nuclear Association. (Febrero de 2015). *world-nuclear*. Obtenido de <http://world-nuclear.org/info/Current-and-Future-Generation/Nuclear-Power-in-the-World-Today/>

Zanelli, J. (2007). *Dilema energético: La energía nuclear*. Santiago de Chile. Recuperado el 08 de enero de 2016, de [http://www.cepchile.cl/dms/archivo\\_4769\\_2891/rev121\\_JZanelli.pdf](http://www.cepchile.cl/dms/archivo_4769_2891/rev121_JZanelli.pdf)

## ANEXOS

### Anexo 1: Fisión Nuclear

En física nuclear, la fisión es una reacción nuclear, lo que significa que tiene lugar en el núcleo atómico. La fisión ocurre cuando un núcleo pesado se divide en dos o más núcleos más pequeños, además de algunos subproductos como neutrones libres, fotones (generalmente rayos gamma) y otros fragmentos del núcleo como partículas alfa (núcleos de helio) y beta (electrones y positrones de alta energía). Su descubrimiento se debe a Otto Hahn y Lise Meitner, aunque fue el primero el único en recibir el Premio Nóbel por el mismo.

La fisión de núcleos pesados es un proceso exotérmico, lo que supone que se liberan cantidades sustanciales de energía. El proceso genera mucha más energía que la liberada en las reacciones químicas convencionales, en las que están implicadas las cortezas electrónicas; la energía se emite, tanto en forma de radiación gamma como de energía cinética de los fragmentos de la fisión, que calentarán la materia que se encuentre alrededor del espacio donde se produzca la fisión.

La fisión se puede inducir por varios métodos, incluyendo el bombardeo del núcleo de un átomo fisionable con una partícula de la energía correcta; la partícula es generalmente un neutrón libre. Este neutrón libre es absorbido por el núcleo, haciéndolo inestable (a modo de ejemplo, se podría pensar en la inestabilidad de

una pirámide de naranjas en el supermercado, al lanzarse una naranja contra ella a la velocidad correcta). El núcleo inestable entonces se partirá en dos o más pedazos: los productos de la fisión que incluyen dos núcleos más pequeños, hasta siete neutrones libres (con una media de dos y medio por reacción), y algunos fotones.

Los núcleos atómicos lanzados como productos de la fisión pueden ser varios elementos químicos. Los elementos que se producen son resultado del azar, pero estadísticamente el resultado más probable es encontrar núcleos con la mitad de protones y neutrones del átomo fisionado original.

Los productos de la fisión son generalmente altamente radiactivos, no son isótopos estables; estos isótopos entonces decaen, mediante cadenas de desintegración.

Una reacción en cadena ocurre como sigue: un acontecimiento de fisión empieza lanzando 2 ó 3 neutrones en promedio como subproductos. Estos neutrones se escapan en direcciones al azar y golpean otros núcleos, incitando a estos núcleos a experimentar fisión. Puesto que cada acontecimiento de fisión lanza 2 o más neutrones, y estos neutrones inducen otras fisiones, el proceso se acelera rápidamente y causa la reacción en cadena. El número de neutrones que escapan de una cantidad de uranio depende de su área superficial. Solamente los materiales fisibles son capaces de sostener una reacción en cadena sin una

fuentes de neutrones externa. Para que la reacción en cadena de fisión se lleve a cabo es necesario adecuar la velocidad de los neutrones libres, ya que si impactan con gran velocidad sobre el núcleo del elemento fisible, puede que simplemente lo atraviese o lo impacte, y que este no lo absorba.

El uranio natural se compone de tres isótopos:  $^{234}\text{U}$  (0,006%),  $^{235}\text{U}$  (0,7%), y  $^{238}\text{U}$  (99,3%). La velocidad requerida para que se produzca un acontecimiento de fisión y no un acontecimiento de captura es diferente para cada isótopo.

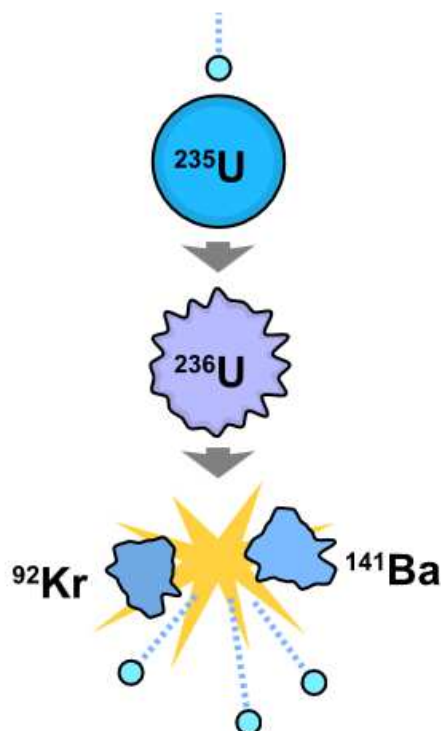
El uranio-238 tiende a capturar neutrones de velocidad intermedia, creando  $^{239}\text{U}$ , que decae sin fisión a plutonio-239, que sí es fisible. Debido a su capacidad de producir material fisible, a este tipo de materiales se les suele llamar fértiles.

Los neutrones de alta velocidad (52.000 km/s), como los producidos en una reacción de fusión tritio-deuterio, pueden fisionar el uranio-238. Sin embargo los producidos por la fisión del uranio-235, de hasta 28.000 km/s, tienden a rebotar inelásticamente con él, lo cual los desacelera. En un reactor nuclear, el  $^{238}\text{U}$  tiende, pues, tanto a desacelerar los neutrones de alta velocidad provenientes de la fisión del uranio-235 como a capturarlos (con la consiguiente transmutación a plutonio-239) cuando su velocidad se modera.

El uranio-235 fisiona con una gama mucho más amplia de velocidades de neutrones que el  $^{238}\text{U}$ . Puesto que el uranio-238 afecta a muchos neutrones sin

inducir la fisión, tenerlo en la mezcla es contraproducente para promover la fisión. De hecho, la probabilidad de la fisión del  $^{235}\text{U}$  con neutrones de velocidad alta puede ser lo suficientemente elevada como para hacer que el uso de un moderador sea innecesario una vez que se haya suprimido el  $^{238}\text{U}$ .

Sin embargo, el  $^{235}\text{U}$  está presente en el uranio natural en cantidades muy reducidas (una parte por cada 140). La diferencia relativamente pequeña en masa entre los dos isótopos hace, además, que su separación sea difícil. La posibilidad de separar  $^{235}\text{U}$  fue descubierta con bastante rapidez en el proyecto Manhattan, lo que tuvo gran importancia para su éxito.



## **Anexo 2: Accidente central Fukushima**

El 11 de marzo de 2011, a las 14:46 JST (tiempo estándar de Japón (UTC+9)) se produjo un terremoto magnitud 9,0 en la escala sismológica de magnitud de momento, en la costa noreste de Japón. Ese día los reactores 1, 2 y 3 estaban operando, mientras que las unidades 4, 5 y 6 estaban en corte por una inspección periódica.<sup>4</sup> Cuando el terremoto fue detectado, las unidades 1, 2 y 3 se apagaron automáticamente (llamado SCRAM en reactores con agua en ebullición). Al apagarse los reactores, paró la producción de electricidad. Normalmente los reactores pueden usar la electricidad del tendido eléctrico externo para enfriamiento y cuarto de control, pero la red fue dañada por el terremoto. Los motores diésel de emergencia para la generación de electricidad comenzaron a funcionar normalmente, pero se detuvieron abruptamente a las 15:41 con la llegada del tsunami que siguió al terremoto.

La ausencia de un muro de contención adecuado para los tsunamis de más de 38 metros que han sucedido en la región permitió que el maremoto (de 15 metros en la central y hasta 40,5 en otras zonas) penetrase sin oposición alguna. La presencia de numerosos sistemas críticos en áreas inundables facilitó que se produjese una cascada de fallos tecnológicos, culminando con la pérdida completa de control sobre la central y sus reactores.

Los primeros fallos técnicos se registraron el mismo día en que se produjo el sismo, viernes 11 de marzo, con la parada de los sistemas de refrigeración de dos reactores y de cuatro generadores de emergencia. A consecuencia de estos incidentes surgieron evidencias de una fusión del núcleo parcial en los reactores 1, 2 y 3, explosiones de hidrógeno que destruyeron el revestimiento superior de los edificios que albergaban los reactores 1,3 y 4 y una explosión que dañó el tanque de contención en el interior del reactor 2. También se sucedieron múltiples incendios en el reactor 4. Además, las barras de combustible nuclear gastado almacenadas en las piscinas de combustible gastado de las unidades 1-4 comenzaron a sobrecalentarse cuando los niveles de dichas piscinas bajaron. El reactor 3 empleaba un combustible especialmente peligroso denominado "MOX", formado por una mezcla de uranio más plutonio.

El miedo a filtraciones de radiación llevó a las autoridades a evacuar un radio de veinte kilómetros alrededor de la planta, extendiendo luego este radio a treinta y posteriormente a cuarenta. Los trabajadores de la planta sufrieron exposición a radiación en varias ocasiones y fueron evacuados temporalmente en distintas ocasiones.

El lunes 11 de abril la Agencia de Seguridad Nuclear e Industrial (NISA) elevó el nivel de gravedad del incidente a 7 para los reactores 1, 2 y 3, el máximo en la escala INES y el mismo nivel que alcanzó el accidente de Chernobyl de 1986.<sup>89</sup>

Dada la magnitud del incidente, las autoridades declararon inmediatamente el «estado de emergencia nuclear», procediendo a la adopción de medidas urgentes encaminadas a paliar los efectos del accidente. Así, se evacuó a la población residente en las zonas adyacentes (con un aumento progresivo del perímetro de seguridad) y se movilizaron las fuerzas armadas para controlar la situación. En el transcurso de los días se fueron tomando nuevas decisiones, como inyectar agua marina y ácido bórico en alguno de los reactores, suministrar yoduro de potasio a la población o desplazar los vuelos de la aviación civil del entorno de la central afectada. Las medidas adoptadas, tanto las dirigidas a controlar el accidente nuclear como las enfocadas a garantizar la estabilidad del sistema financiero nipón, fueron respaldadas por organismos tales como la Organización Mundial de la Salud o el Fondo Monetario Internacional.

En junio de 2011, se confirmó que los tres reactores activos en el momento de la catástrofe habían sufrido la fusión del núcleo.



### **Anexo 3: Enriquecimiento del Uranio**

El enriquecimiento de uranio es el proceso al cual es sometido el uranio natural para obtener el isótopo  $^{235}\text{U}$  conocido como uranio enriquecido. El uranio natural se compone principalmente del isótopo  $^{238}\text{U}$ , con una proporción en peso de alrededor del 0,7 % de  $^{235}\text{U}$ , el único isótopo en cantidad apreciable existente en la naturaleza que es fisiónable mediante neutrones térmicos. Durante el enriquecimiento, el contenido porcentual de  $^{235}\text{U}$  en el uranio natural se incrementa gracias al proceso de separación de isótopos.

Puesto que los diferentes isótopos del uranio son químicamente indistinguibles, ya que la corteza electrónica de todos ellos tiene la misma estructura, es necesario aprovechar las diferencias en propiedades físicas como la masa (mediante difusión gaseosa o centrifugación) o las pequeñas diferencias en las energías de transición entre niveles de los electrones (mediante excitación diferencial con láser) para aumentar la proporción de  $^{235}\text{U}$  con respecto al valor que se encuentra en la naturaleza.

El proceso de enriquecimiento se aplica tras haber separado el uranio de las impurezas por medios químicos. En el método históricamente utilizado a escala industrial, la difusión gaseosa, el uranio se encuentra en forma de hexafluoruro de uranio. Tras el enriquecimiento, el hexafluoruro de uranio es transformado en

plantas químicas especiales en dióxido de uranio, material cerámico que se utiliza finalmente como combustible en los reactores nucleares.

En el proceso de diferencia de masas se basan el método de difusión a través de membranas y los calutrones. En las diferencias en los niveles energéticos, se basa la separación por rayos láser.

Las técnicas necesarias para el enriquecimiento son suficientemente complejas como para necesitar un laboratorio avanzado y de importantes inversiones de capital, pero lo suficientemente sencillas como para estar al alcance de prácticamente cualquier país del mundo. En las condiciones de operación de los reactores comerciales de agua ligera, el isótopo  $^{235}\text{U}$  presenta una sección eficaz de fisión mayor que los otros nucleidos del uranio. Para conseguir una tasa de fisiones suficientemente alta como para mantener la reacción en cadena es necesario aumentar la proporción del nucleido  $^{235}\text{U}$  en el combustible nuclear de tales centrales.

En el Proyecto Manhattan al uranio enriquecido se le denominó en código oralloy, abreviatura de Oak Ridge alloy (aleación), por la planta en la que el uranio era enriquecido. El término oralloy todavía se usa en ocasiones para referirse al uranio enriquecido.

El  $^{238}\text{U}$  que permanece tras el enriquecimiento es conocido como uranio empobrecido (depleted uranium, en inglés), y es considerablemente menos radiactivo incluso que el uranio natural, a pesar de que es extremadamente denso y útil para vehículos blindados y armas para atravesar blindajes y otras aplicaciones en las que se requiera una alta densidad.