

**Condiciones necesarias para la implementación segura de un  
programa nuclear de potencia en Chile.**

**INFORME FINAL**

**Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN)**

Diciembre 2017

20809 / IIT-003 v. 0B

No se permite la reproducción total o parcial de este documento, ni su incorporación a un sistema informático, ni su transmisión en cualquier forma o por cualquier medio, sea éste electrónico, mecánico, por fotocopia, por grabación u otros métodos, sin el permiso previo y por escrito de. IDOM, CONSULTING, ENGINEERING, ARCHITECTURE, S.A.U.

Copyright © 2017, IDOM CONSULTING, ENGINEERING, ARCHITECTURE, S.A.U




---

## Condiciones necesarias para la implementación segura de un programa nuclear de potencia en Chile. INFORME FINAL

---

Redactado:	Revisado:	Aprobado:
<i>Firma</i> 	<i>Firma</i> 	<i>Firma</i> 
<i>Nombre</i> Albert Janés (AJR) Daniel López (DLS)	<i>Nombre</i> Gabriel Esteban (GEL)	<i>Nombre</i> Gabriel Esteban (GEL)
<i>Fecha</i> 05/12/2017	<i>Date</i> 05/12/2017	<i>Date</i> 05/12/2017

<i>Área</i>	<i>Encargo</i>	<i>Informe</i>	<i>Versión</i>	<i>CD</i>
NS	20809	IIT-003	0B	07.03

*En blanco intencionadamente*

Condiciones necesarias para la implementación segura de un programa nuclear de potencia en Chile.  
INFORME FINAL

## TABLA DE VERSIONES

<i>Versión</i>	<i>Fecha</i>	<i>Objeto de la versión</i>
0A	11-2017	Versión inicial
0B	12-2017	Inclusión comentarios CCHEN

## MODIFICACIONES RESPECTO A LA VERSIÓN ANTERIOR

Se incluyen las modificaciones acordadas con la CCHEN, las cuales se encuentran recogidas en el Acta de Levantamiento de comentarios E-02-LC-SEG-003, con fecha 01-12-2017.

## LISTA DE PENDIENTES

<i>No.</i>	<i>Apartado</i>	<i>Descripción</i>
N/A	N/A	N/A

---

Condiciones necesarias para la implementación segura de un programa nuclear de potencia en Chile.  
INFORME FINAL

*En blanco intencionadamente*

Condiciones necesarias para la implementación segura de un programa nuclear de potencia en Chile.  
INFORME FINAL

## ÍNDICE DE CONTENIDO

<b>1.</b>	<b>ANTECEDENTES .....</b>	<b>1</b>
<b>2.</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>2</b>
<b>3.</b>	<b>ALCANCE .....</b>	<b>3</b>
<b>4.</b>	<b>EL CONTEXTO ENERGÉTICO CHILENO .....</b>	<b>4</b>
<b>5.</b>	<b>CONCEPTOS DE SEGURIDAD NUCLEAR.....</b>	<b>5</b>
<b>6.</b>	<b>ESTADO DEL ARTE EN MATERIA DE SEGURIDAD NUCLEAR.....</b>	<b>9</b>
6.1.	Identificación y evaluación de eventos relevantes en plantas nucleares de potencia .....	9
6.2.	Conclusiones generales sobre el análisis de eventos .....	11
6.3.	Parámetros de evaluación de tecnologías frente a la seguridad nuclear.....	16
6.3.1.	Listado de parámetros de evaluación de tecnologías frente a la seguridad nuclear .....	16
6.3.2.	Parámetros de evaluación de nuevas tecnologías de reactores frente a la seguridad nuclear .....	20
<b>7.</b>	<b>SISMOLOGÍA E IMPACTO EN LA SEGURIDAD DE CENTRALES NUCLEOELÉCTRICAS.....</b>	<b>26</b>
7.1.	Listado de eventos sísmicos.....	27
7.2.	Conclusiones de los eventos sísmicos y su afectación a las centrales nucleares. 31	
<b>8.</b>	<b>EVALUACIÓN DEL ESTADO ACTUAL DE LA INFRAESTRUCTURA NUCLEAR DE CHILE EN MATERIA DE SEGURIDAD.....</b>	<b>33</b>
8.1.	El OIEA y las necesidades de infraestructura de seguridad nuclear .....	33
8.2.	El estado de la infraestructura de seguridad nuclear de Chile .....	34
8.3.	Conclusiones del estudio .....	45
<b>9.</b>	<b>CONCLUSIONES GENERALES.....</b>	<b>48</b>
<b>10.</b>	<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>51</b>

Condiciones necesarias para la implementación segura de un programa nuclear de potencia en Chile.  
INFORME FINAL

## ÍNDICE DE FIGURAS

Ilustración 1: Tasa de crecimiento del consumo energético per cápita para Chile, Latino América y Caribe, y la OCDE [2]. .....	4
Ilustración 2: Modelo simple de un sistema nuclear nacional robusto [5]. .....	6
Ilustración 3: Localización de la zona de derrame del núcleo fundido (área rectangular). Fuente: [12]. .....	21
Ilustración 4: Fases consideradas por el OIEA en SSG-16 [1] .....	35
Ilustración 5: Acciones resultantes. ....	50

## ÍNDICE DE ACRÓNIMOS Y SIGLAS

ABWR	Advanced Boiling Water Reactor
BWR	Boiling Water Reactor
CANDU	CANada Deuterium Uranium
CCHEN	Comisión Chilena de Energía Nuclear
CEN	Centro de Estudios Nucleares
CSN	Consejo de Seguridad Nuclear
DOE	Department Of Energy
ERNC	Energías Renovables No Convencionales
GDI	Grupo de Interés
GEI	Gases de Efecto Invernadero
GNL	Gas Natural Licuado
INES	International Nuclear and Radiological Event Scale
INPO	Institute of Nuclear Power Operations
IRS	Incident Reporting System
IRWST	In-containment Refueling Water Storage Tank
LWR	Light Water Reactor
NRA	Nuclear Regulation Authority
NRC	Nuclear Regulatory Commission
OIEA (IAEA)	Organismo Internacional de la Energía Atómica
ONEMI	Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior
ORN	Organismo Regulador Nuclear
PNP	Programa Nuclear de Potencia



---

Condiciones necesarias para la implementación segura de un programa nuclear de potencia en Chile.  
INFORME FINAL

PWR	Pressurized Water Reactor
RECH	Reactor Nuclear Experimental Chileno
SIC	Sistema Interconectado Central
SING	Sistema Interconectado Norte Grande
UNGG	Uranium Naturel Graphite Gaz
WANO	World Association of Nuclear Operators
WENRA	Western European Nuclear Regulators Association
WNA	World Nuclear Association

---

Condiciones necesarias para la implementación segura de un programa nuclear de potencia en Chile.  
INFORME FINAL

*En blanco intencionadamente*

Condiciones necesarias para la implementación segura de un programa nuclear de potencia en Chile.  
INFORME FINAL

## 1. ANTECEDENTES

La Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN) es el organismo técnico del Gobierno de Chile encargado de atender los problemas relacionados con la producción, adquisición, transferencia, transporte y uso pacífico de la energía atómica y de los materiales fértiles, fisionables y radiactivos, así como de regular, fiscalizar y controlar las instalaciones nucleares y radiactivas en el país.

La CCHEN impulsa y gestiona una plataforma tecnológica nuclear, consistente en dos reactores nucleares experimentales (RECH) y un ciclotrón, que da servicio a áreas como: medicina, minería, agricultura, ambiente e industria. La CCHEN, en su calidad de organismo asesor del estado en materias relacionadas con los usos pacíficos de la energía nuclear y en particular de asesor en materias de la generación de energía eléctrica en base a la energía nuclear, ha recibido el mandato de liderar el desarrollo de los estudios requeridos para que, durante el próximo proceso de evaluación de la Política Energética Nacional, la energía nuclear de potencia pueda ser considerada dentro de las posibles opciones para la matriz energética. En este contexto, surge la necesidad de realizar estudios que aborden las preocupaciones fundamentales de la ciudadanía con respecto al uso de este tipo de tecnología, siendo una de las más relevantes la seguridad en la implementación y la operación de una central nuclear de potencia.

Para abordar este proceso, IDOM ha sido adjudicado, mediante la licitación referencia ID: 872-19-LP17 "Condiciones necesarias para la implementación segura de un programa nuclear", con el objeto de identificar las condiciones de infraestructura nacional necesaria en materia de seguridad, si se optara por un programa nuclear de potencia en el país, considerando las últimas mejoras en los estándares internacionales. Esta licitación se divide en dos tareas: (1) estudio sobre el estado del arte de la industria nuclear en términos de seguridad (OE1) y (2) estudio para identificar las brechas nacionales y propuesta de acciones en materia de seguridad (OE2). El presente informe representa el informe final en el que se resumen las principales conclusiones de ambos estudios.

---

Condiciones necesarias para la implementación segura de un programa nuclear de potencia en Chile.  
INFORME FINAL

## 2. OBJETIVOS

El objetivo particular del presente informe es recoger el resumen de las principales conclusiones derivadas de los estudios de relacionados con la seguridad nuclear realizadas mediante los dos enfoques siguientes:

- Describir y analizar el estado del arte de la industria nuclear en términos de seguridad evaluando cómo ha evolucionado a lo largo de la historia e identificando en base a eso los criterios que permitan comparar tecnologías.
- Identificar brechas de la infraestructura de Chile y propuesta de acción en materias de seguridad nuclear frente a los estándares actuales de la industria nuclear internacional.

Condiciones necesarias para la implementación segura de un programa nuclear de potencia en Chile.  
INFORME FINAL

### 3. ALCANCE

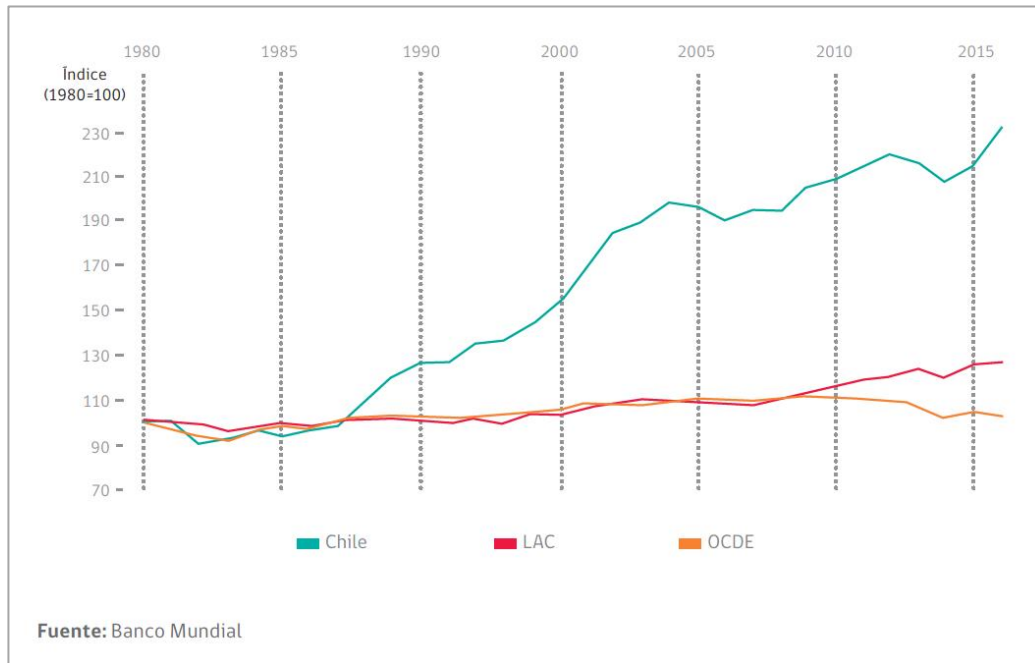
El alcance de los trabajos del presente estudio ha cubierto los siguientes aspectos:

- Elaboración de un estudio para describir y analizar el estado del arte de la industria nuclear en términos de seguridad, siendo las actividades desarrolladas las siguientes:
  - o Descripción del concepto de **seguridad nuclear** y evolución histórica del concepto.
  - o Selección de los eventos nucleares más significativos, de acuerdo a una serie de criterios.
  - o Evaluación de estos eventos nucleares seleccionados, analizando:
    - Una descripción del evento.
    - Las causas que provocaron el evento.
    - Las medidas implantadas a raíz del evento.
    - El impacto de estas medidas sobre la seguridad nuclear.
  - o Determinación, recomendación y clasificación de parámetros cualitativos y cuantitativos para comparar la seguridad entre tecnologías nucleares.
  - o Análisis de la vulnerabilidad de las centrales nucleares existentes, ante eventos sísmicos acontecidos a lo largo de las últimas décadas, identificando la afectación de estos eventos sobre la seguridad nuclear de las plantas.
- Elaboración de un estudio de la infraestructura nuclear chilena para la identificación de brechas frente a los 20 requisitos establecidos en la guía de seguridad SSG-16 [1] del OIEA para la Fase 1, y proposición del plan de acción para cubrir las mismas en el caso de que Chile opte por implantar un programa nuclear de potencia.

Condiciones necesarias para la implementación segura de un programa nuclear de potencia en Chile.  
INFORME FINAL

#### 4. EL CONTEXTO ENERGÉTICO CHILENO

El Ministerio de Energía de Chile lleva años estudiando la evolución del consumo energético del país, observando que el mismo presenta cada vez una demanda creciente y un aumento en la complejidad del sistema de distribución energético.



**Ilustración 1: Tasa de crecimiento del consumo energético per cápita para Chile, Latino América y Caribe, y la OCDE [2].**

Con la definición de la política energética en el escenario 2015-2050, Chile está en condiciones de considerar todas aquellas alternativas que puedan significar una garantía para el desarrollo del país, por lo que se no descarta a priori ninguna tecnología de generación. La energía nuclear de potencia no ha sido incluida como una opción a corto plazo, pues requiere de estudios en aspectos claves, como la seguridad nuclear, viabilidad económica de largo plazo ante distintas condiciones legales y de mercado, los ajustes legales e institucionales requeridos, entre otros. Estos estudios están siendo desarrollados desde la Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN) con el fin de tener información objetiva que permita estudiar la conveniencia de incorporar esta tecnología a la matriz de generación eléctrica en el próximo proceso de evaluación de la Política Energética de largo plazo.

El presente informe se enmarca como parte de dichos trabajos, evaluando las capacidades y necesidades de infraestructura nacional de que dispone el país, siendo la Seguridad Nuclear el eje primordial de este análisis.

Condiciones necesarias para la implementación segura de un programa nuclear de potencia en Chile.  
INFORME FINAL

## 5. CONCEPTOS DE SEGURIDAD NUCLEAR

La seguridad nuclear tiene como objetivo fundamental proteger a las personas y el medio ambiente contra los efectos nocivos de las radiaciones ionizantes (OIEA, SF-1 [3]).

Para el desarrollo e implantación de la seguridad nuclear, se establecen una serie de principios o mecanismos que se describen a continuación:

### Defensa en profundidad

De acuerdo con INSAG-10 [4], la definición de defensa en profundidad es la siguiente:

*“La defensa en profundidad consiste en el despliegue jerárquico de diferentes niveles de componentes, sistemas, estructuras y procedimientos para mantener la eficacia de las barreras físicas interpuestas entre el material radioactivo y los trabajadores, el público y el medio ambiente, tanto en operación normal como en transitorios previstos y, para ciertas barreras, también en accidentes.”*

Además, la defensa en profundidad abarca todas las actividades relacionadas con la seguridad, incluyendo aquellas que se den en la selección del emplazamiento, el diseño, fabricación, construcción, puesta en funcionamiento, operación, y desmantelamiento de centrales nucleares.

Uno de los aspectos importantes de la defensa en profundidad, la relevancia del cual ha sido comprendida de forma notable a raíz del accidente de Fukushima Daichi, en Marzo de 2011, es el concepto de fortaleza en profundidad institucional. Tal y como define el INSAG-27 del OIEA, [5], se identifican 3 sub-sistemas principales para promover el éxito de la seguridad nuclear (tal y como se indica en la Ilustración 2):

- La industria nuclear, dónde el operador o el propietario tienen la responsabilidad principal sobre la seguridad nuclear.
- El sub-sistema regulatorio, con el regulador nacional como responsable para una visión independiente del operador o propietario, respecto a la seguridad nuclear.
- Las partes interesadas, las cuales incluyen a varias instituciones (básicamente el público y los representantes de éste).

Los 3 sub-sistemas son complejos e incluyen a varias instituciones. Deben ser todos ellos sub-sistemas robustos para que se pueda, globalmente, alcanzar la función general en cuanto a seguridad nuclear. Las interacciones entre la industria nuclear, el regulador y las partes interesadas influyen la forma en la que las distintas partes actúan y se comunican. Aunque

Condiciones necesarias para la implementación segura de un programa nuclear de potencia en Chile.  
INFORME FINAL

existan herramientas internacionales de seguridad nuclear, como los estándares de seguridad y procesos de revisión por pares internacionales, el accidente de Fukushima demostró que estos procesos no eran suficientes para que se alcanzara la fortaleza en profundidad institucional, por lo que se debe incluir este concepto de fortaleza en profundidad, en las revisiones por pares externas al operador, el regulador y la infraestructura nacional, prestando especial atención a aquellas partes que entren al sector nuclear por primera vez, ya que la infraestructura (incluyendo el desarrollo del regulador), puede no estar tan avanzada como en países con un programa nuclear desarrollado. El concepto de fortaleza en profundidad institucional debe ser implantado en las etapas iniciales de un nuevo programa nuclear.



Ilustración 2: Modelo simple de un sistema nuclear nacional robusto [5].

### Cultura de Seguridad

La definición del concepto de cultura de seguridad derivado del cuarto INSAG de la OIEA es la siguiente [6]:

*“La cultura de seguridad es el conjunto de características y comportamientos de organizaciones e individuos que establecen que, como prioridad fundamental, los asuntos relacionados con la seguridad de la central nuclear reciben una atención acorde a su importancia.”*



Condiciones necesarias para la implementación segura de un programa nuclear de potencia en Chile.  
INFORME FINAL

El concepto de cultura de seguridad se resume en considerar que la seguridad es el ítem de máxima prioridad en la organización y la realización de cualquiera de las actividades relacionadas con una instalación nuclear.

La cultura de seguridad tiene dos principales componentes: el primero, las políticas organizacionales y de gestión que establecen su marco de aplicación, que son responsabilidad de la jerarquía de la gestión. El segundo es el comportamiento del personal, en todos los niveles, al responder a y beneficiarse del marco.

#### Experiencia operativa

El seguimiento y el análisis de la experiencia operativa, tanto propia como ajena, es una de las fuentes de información y realimentación más importante para el aprendizaje y la mejora de la seguridad y de la fiabilidad de cada instalación nuclear. Es esencial recopilar y analizar, de forma sistemática, la información generada durante las distintas fases de la vida de una instalación, desde la construcción hasta la operación, el cese de explotación y el desmantelamiento.

#### Análisis de seguridad

Los análisis de seguridad son actividades encaminadas a:

- Analizar la calidad y el nivel de protección de las disposiciones de seguridad.
- Identificar las maneras en las que se podría incurrir en exposiciones a la radiación normales y potenciales.
- Determinar los niveles esperados de exposición normal, y las probabilidades y niveles de exposiciones potenciales.

#### Evaluación inicial y continuada de la seguridad

La evaluación inicial de la seguridad de una central nuclear constituye, dentro del proceso de obtención de la autorización para el funcionamiento, la realización de los análisis de seguridad y demás documentos preceptivos, los cuales constituyen la base para la justificación de que la planta operará de forma segura.

Tal y como se refleja en el documento del OIEA, GSR Part 2, “*Leadership and Management for Safety*” [7] (documento sobre el que se basa la Instrucción de Seguridad 19 del Consejo de Seguridad español, IS-19 [8]), la evaluación continuada de la seguridad consiste en la realización de autoevaluaciones continuas, periódicas y puntuales de las actividades y procesos relacionados con la seguridad de la instalación, para analizar la ejecución de los trabajos y la mejora de la cultura de la seguridad. También requiere la realización sistemática, en nombre de la alta dirección, de evaluaciones independientes, internas y externas, para evaluar la eficacia

---

Condiciones necesarias para la implementación segura de un programa nuclear de potencia en Chile.  
INFORME FINAL

con que los procesos cumplen y logran las metas, las estrategias, los planes y los objetivos, e identificar oportunidades de mejora. Las evaluaciones externas, globales de todos los aspectos de la organización, importantes para la seguridad o específicas sobre aspectos concretos, son para contrastar el funcionamiento de la organización con las mejores prácticas nacionales e internacionales.

Condiciones necesarias para la implementación segura de un programa nuclear de potencia en Chile.  
INFORME FINAL

## **6. ESTADO DEL ARTE EN MATERIA DE SEGURIDAD NUCLEAR.**

### **6.1. Identificación y evaluación de eventos relevantes en plantas nucleares de potencia**

Uno de los objetivos de este estudio ha sido analizar como la industria nuclear ha ido aprendiendo de los eventos ocurridos con el propósito de trabajar bajo el máximo nivel de seguridad. Para ello se han estudiado una serie de eventos e incidentes nucleares significativos a lo largo de la historia, los cuales se han seleccionado siguiendo los siguientes criterios:

- Nivel de gravedad según la escala INES.
- Impacto de sus lecciones aprendidas.
- Distintas tecnologías de reactores (e.g. reactores de agua ligera “LWR”, Reactores de agua pesada “HWR”, Reactores refrigerados por gas y moderados por grafito “UNGG”, reactores refrigerados por agua y moderados por grafito “CANDU”, reactores de tecnología rusa “RBMK” y “VVER”).
- Sucesos iniciadores de los eventos de distinto origen (i.e. origen interno o bien origen externo).
- Aspectos no ligados a la tecnología del reactor intrínsecamente, si no relacionadas con la cultura de seguridad de las entidades (e.g. organismo regulador, legislador, operadores).
- Eventos no relacionados con la seguridad nuclear directamente, si no con la seguridad “industrial” (e.g. rotura de líneas de vapor con impactos importantes en los trabajadores).

Teniendo en consideración estos criterios, se incluye a continuación una tabla con la lista de eventos considerados, indicando para cada uno de ellos su clasificación en la escala INES, así como la tecnología de reactor de cada uno de ellos.

Condiciones necesarias para la implementación segura de un programa nuclear de potencia en Chile.  
INFORME FINAL

<b>Evento</b>	<b>Año Evento</b>	<b>Clasificación INES</b>	<b>Tecnología de reactor</b>	<b>Clasificación por tecnología y cultura de operación</b>	
Chernobyl-4	1986	7	RBMK-1000 (Segunda generación)	Tecnología rusa (RBMK, VVER)	
Greifswald-1	1975	3	VVER-230		
Kozloduy-5	2006	2	VVER-1000/V320		
Leningrad-1	1975	--*	RBMK-1000 (Primera generación)	Tecnología occidental operada por occidente (LWR)	
Three Mile Island-2	1979	5	LWR, PWR (B&W)		
Browns Ferry-1	1975	--*	LWR, BWR (General Electric, MARK 1)		
Davis Besse	2002	3	LWR, PWR (B&W)		
Le Blayais	1999	2	LWR, PWR		
Vandellós II	2004	2	LWR, PWR (Westinghouse)		
Ascó I	2008	2	LWR, PWR (Westinghouse)		
Saint- Laurent-des- Eaux	1980	4	UNGG		Tecnología francesa (UNGG)
Vandellós I	1989	3	UNGG		
Pickering A- 2	1994	2	PHWR, CANDU 500A		Tecnología canadiense (PHWR)

Condiciones necesarias para la implementación segura de un programa nuclear de potencia en Chile.  
INFORME FINAL

Evento	Año Evento	Clasificación INES	Tecnología de reactor	Clasificación por tecnología y cultura de operación
Fukushima	2011	7	LWR, BWR (General Electric, MARK 1)	Tecnología occidental operada por oriente (LWR)
Mihama-3	2004	1	LWR, PWR (Westinghouse)	

(\*Nota: dado que la escala de clasificación INES fue desarrollada por expertos de la OIEA a principios de los años 90, algunos de los eventos más antiguos no disponen de clasificación en dicha escala, o esta clasificación no es públicamente accesible).

El análisis realizado para cada uno de los eventos, el cual contiene las causas que motivaron los sucesos, la evaluación de las vulneraciones, debilidades y fallos en los principios de la seguridad nuclear (principios identificados según el documento del OIEA, INSAG-12 "Basic Safety Principles for Nuclear Power Plants" [10]), y la identificación de las distintas medidas implantadas después de los eventos para fortalecer a la industria e impedir la recurrencia futura de eventos similares, puede verse en detalle en el informe IIT-001 "Estudio sobre el Estado del Arte de la Industria Nuclear en términos de Seguridad" [11].

Las conclusiones extraídas de este análisis en profundidad, pueden leerse en el siguiente apartado 6.2.

## 6.2. Conclusiones generales sobre el análisis de eventos.

Las conclusiones principales a nivel global extraídas tras el análisis de los 15 eventos (i.e. las causas que motivaron los sucesos, la evaluación de las vulneraciones, debilidades y fallos en la seguridad nuclear, y la identificación de las distintas medidas implantadas después de los eventos), y que en definitiva permiten determinar la evolución de la seguridad nuclear y el estado del arte actual, son las siguientes:

La gravedad y magnitud de cada uno de los 15 eventos analizados, es muy distinta. Si bien, en cuanto al impacto sobre la población y el medio ambiente (e.g. en términos de salud, económicos, de contaminación del suelo y el agua, de confinamiento o evacuación de personas) que estos eventos han tenido, únicamente son destacables 2 de los 15 eventos seleccionados: Chernobyl y Fukushima.

Condiciones necesarias para la implementación segura de un programa nuclear de potencia en Chile.  
INFORME FINAL

En cuanto al impacto sobre la seguridad nuclear, de cada uno de los eventos seleccionados, cabe mencionar que los 3 eventos con un calado más profundo sobre la seguridad nuclear a escala global, son: Three Mile Island, Chernobyl y Fukushima. Estos 3 eventos marcaron un antes y un después en la manera de afrontar la seguridad nuclear.

Después de cada uno de los eventos identificados y descritos en el informe IIT-001 "*Estudio sobre el Estado del Arte de la Industria Nuclear en términos de Seguridad*" [11] , la industria nuclear ha actuado siempre, aplicando una serie de medidas para impedir que estos eventos vuelvan a suceder, y para mejorar la seguridad nuclear en general. Estas actuaciones provienen generalmente de los requerimientos exigidos por el organismo regulador correspondiente y, en varios casos, también las propias entidades explotadoras promueven actuaciones claras para hacer frente a la recurrencia de estos eventos.

Las actuaciones pretenden hacer frente a las causas raíz que han dado lugar al accidente, de forma que no vuelven a darse las condiciones para que un evento similar suceda de nuevo. Las causas raíz que han dado lugar a los eventos analizados, tienen en todos los eventos una naturaleza muy parecida, y pueden agruparse bajo las siguientes categorías:

- Deficiencias en el diseño;
- Deficiencias en la construcción y fabricación;
- Deficiencias de operación y mantenimiento;
- Deficiencias en el factor humano (cultura de seguridad);

Por lo tanto, las medidas que la industria nuclear ha implantado para hacer frente a las causas raíz de los eventos sucedidos (lo que serían las lecciones aprendidas de los eventos), incluyen disposiciones de muy diversa índole, afectando todas ellas de forma directa a los principios de seguridad nuclear definidos de acuerdo a la OIEA, y que quedan resumidas en las siguientes áreas:

- Seguridad en el diseño y construcción:
  - o Mejora de los sistemas de prevención y protección contra incendios de las centrales nucleares. Adaptación a la complejidad de una central nuclear.
  - o Importancia de la protección y prevención frente a fallos de causa común: Implantación clara de la separación física y redundancia de equipos y sistemas (e.g. cableado eléctrico), como dos rasgos altamente importantes de la defensa en profundidad.

---

Condiciones necesarias para la implementación segura de un programa nuclear de potencia en Chile.  
INFORME FINAL

- Los sistemas de seguridad son diseñados de forma intrínsecamente segura. En los sistemas pasivos, por ejemplo, éstos son capaces de hacer frente a ciertos transitorios sin la actuación del operador.
- La contención es una estructura clave para impedir la liberación de productos de fisión al exterior. Un edificio de contención de gran volumen supone un claro beneficio, y todas las nuevas tecnologías se diseñan y construyen con estos edificios de contención.
- Interfaz hombre-máquina: implantación de buenas interfaces hombre-máquina, prestando por lo tanto la debida atención a los factores humanos dentro de la seguridad nuclear, como por ejemplo diseños de sala de control optimizados.
- Realización de análisis de seguridad detallados y extensos, para contemplar todo el espectro de posibilidades, contando estos análisis con revisiones técnicas independientes. Utilización de los análisis probabilistas de la seguridad, para la identificación de vulnerabilidades diversas (tanto en diseño como en operación).
- Mejora de las capacidades para refrigerar el núcleo del reactor y las piscinas de combustible gastado, en caso de eventos de pérdida total de alimentación eléctrica (SBO). Las piscinas de combustible gastado han resultado ser uno de los puntos de atención más relevantes, debido a la fragilidad de éstas frente a eventos como el de Fukushima.
- Reevaluación de las vulnerabilidades de las plantas respecto a eventos externos extremos y de muy baja ocurrencia, con potencial afectación a varias unidades en un mismo emplazamiento, y evaluación del margen disponible para hacer frente a estos eventos, respecto a aquello considerado en las bases de diseño originales. En el caso europeo, estas reevaluaciones fueron denominadas Stress Test, o pruebas de resistencia. Implantación de mejoras en áreas con fragilidades o vulnerabilidades detectadas a raíz de las reevaluaciones. Chile participó, a través del Foro Iberoamericano de Organismos Reguladores Radiológicos y Nucleares (asociación a la cual Chile pertenece), en la revisión de estas pruebas de resistencia de las centrales de los países miembro.
- Implantación de modificaciones de diseño para corregir deficiencias en áreas concretas del diseño de Estructuras, Sistemas y Componentes. Los diseños de

---

Condiciones necesarias para la implementación segura de un programa nuclear de potencia en Chile.  
INFORME FINAL

las modificaciones de diseño son revisados adecuadamente para asegurar su correcto funcionamiento una vez implantados.

- Mitigación de accidentes severos: implantación de medidas técnicas para hacer frente a accidentes severos, como la instalación de recombinadores de hidrógeno pasivos en la contención, la creación de centros de emergencia, ligados a las centrales, con equipos portátiles para inyectar agua y utillaje suficiente para hacer frente a un accidente severo, y la creación de centros de emergencia generales, centralizados, para hacer frente a una emergencia en cualquiera de las centrales bajo su amparo.

- Seguridad operacional (operación y mantenimiento):

La industria nuclear se ha ido embarcando en una serie de proyectos para mejorar la seguridad nuclear operacional, y más en concreto:

- Generación de nuevos procedimientos de operación y de emergencia. Los procedimientos de operación están ahora basados en síntomas, sin la necesidad de que el operador realice ningún diagnóstico de la situación. De esta forma se minimiza el potencial error humano del operador.
- Existencia de los suficientes controles de calidad en las operaciones de mantenimiento. Mejora continua en la gestión del mantenimiento de las plantas, estableciendo cooperación más cercana entre fabricantes y subcontratistas. Realización de auditorías externas e independientes en las tareas de mantenimiento.
- Realimentación de la Experiencia Operativa: una de las causas raíz más recurrentes en los eventos analizados es el hecho de no haber considerado de forma adecuada otros eventos de la industria que pueden ser considerados como eventos precursores. A este efecto, la industria ha creado mecanismos para compartir la experiencia operativa, tanto a nivel nacional, como a nivel internacional. A título de ejemplo:
  - Creación del *Incident Reporting System*, IRS, a través de la NEA/OIEA (*Nuclear Energy Agency/Organismo Internacional de la Energía Atómica*), a escala global.



Condiciones necesarias para la implementación segura de un programa nuclear de potencia en Chile.  
INFORME FINAL

- Creación del INPO (*Institute of Nuclear Power Operations*), a escala nacional en Estados Unidos, como herramienta para un efectivo intercambio de información entre operadores, dentro de la industria norteamericana.
- Creación del WANO (*World Association of Nuclear Operators*), a escala internacional, como herramienta de compartición de experiencia operativa a escala global.
- Gestión y mitigación de accidentes severos (a nivel técnico y organizativo): se han implantado mejoras en el quinto nivel de la defensa en profundidad para hacer frente y para gestionar accidentes severos. Algunas de estas medidas son: mejora de las guías de accidente severo (incluyendo equipos, procedimientos y entrenamiento).
- Factor humano (cultura de seguridad):
  - Cultura de seguridad implantada a nivel general en materia nuclear, tanto a nivel nacional como a nivel local. Tanto al nivel legislativo, nivel regulatorio, nivel de los titulares de las instalaciones, incluyendo a supervisores y operadores propiamente. La seguridad es siempre la prioridad frente a la producción. Los operadores no vulneran los procedimientos de operación.
  - Organismo regulador completamente efectivo e independiente, priorizando siempre la seguridad frente a la producción.
  - Realización de auditorías tanto internas como externas, con presencia de organismos internacionales (expertos de la OIEA a escala internacional, WANO a escala global también, o INPO en el caso de Estados Unidos).
  - Armonización de la seguridad nuclear. Concepto que persigue una aproximación común a la seguridad nuclear, así como una visión transversal de la misma, permitiendo un intercambio de información fluido entre sus miembros, ya sean operadores o reguladores. Uno de los objetivos de organizaciones como INPO, WANO, NEA/OIEA, ó WENRA es justamente esta armonización. Otras herramientas creadas para este fin (en este caso a raíz del accidente de Chernobyl), fueron la “Convención de pronta notificación en caso de accidente nuclear”, y la “Convención para la asistencia en caso de accidente nuclear o emergencia radiológica”, ambas creadas en 1986, y a las que Chile se adhirió

Condiciones necesarias para la implementación segura de un programa nuclear de potencia en Chile.  
INFORME FINAL

en 2005 y 2004, respectivamente. Otras convenciones en esa misma línea, serían la “Convención sobre Seguridad Nuclear”, aprobada por 84 países en 1994, y a la que Chile se adhirió en 1997, o la Convención Conjunta sobre seguridad en la gestión del combustible gastado y sobre seguridad en la gestión de desechos radiactivos”, aprobada el 1997, y a la que Chile se adhirió en 2011.

Por lo tanto, y como conclusión a lo expuesto en relación a las medidas que la industria nuclear ha implantado en cada uno de los eventos que ha tenido, se trata de una industria madura que es capaz de aprender de las deficiencias y malfuncionamientos, de forma que las causas que han originado estas deficiencias y que han llevado a los incidentes o accidentes, sean identificadas y se tomen medidas correctoras para prevenir su recurrencia futura, tanto en la propia instalación como en el resto de instalaciones en las que potencialmente podría ocurrir, a través de mecanismos de realimentación sólidos que permiten compartir la información de forma fluida y clara, y que incluyen tanto a la propia industria a través de los operadores, como a los cuerpos reguladores que se encargan de la vigilancia y supervisión de las instalaciones nucleares.

### **6.3. Parámetros de evaluación de tecnologías frente a la seguridad nuclear**

#### **6.3.1. Listado de parámetros de evaluación de tecnologías frente a la seguridad nuclear**

De los análisis realizados de los eventos, se ha obtenido un estado del arte detallado de las medidas implantadas (e.g. sistemas, procesos, márgenes de seguridad, medidas administrativas y operacionales, procedimientos de emergencia) que proporcionan una mayor seguridad a las plantas nucleares. De estas medidas, se obtienen unos criterios o parámetros para valorar y comparar la seguridad nuclear en las distintas tecnologías de reactores, como por ejemplo:

- Sistemas de seguridad pasiva (i.e. sistemas que no precisan de la intervención del operador ni de controles activos, dependiendo únicamente de fenómenos físicos como la circulación natural, la convección, la gravedad o la auto-presurización, para su funcionamiento) frente a sistemas de seguridad activa (i.e. sistemas que sí precisan de la intervención del operador o de controles activos),
- Sistemas que permitan hacer frente a un accidente severo con fusión del núcleo o parte de éste,
- Refuerzo de la defensa en profundidad, incrementando la independencia, la redundancia o la separación física,

Condiciones necesarias para la implementación segura de un programa nuclear de potencia en Chile.  
INFORME FINAL

- Refuerzo en los análisis de seguridad (por ejemplo análisis probabilistas de seguridad).

Estos parámetros, se clasifican mediante una serie de atributos (e.g. grado con el que el parámetro está relacionado con las lecciones aprendidas de los eventos de la industria; recurrencia en la aparición del parámetro en el análisis de los eventos; características específicas de Chile, en cuanto a fenómenos externos se refiere, que puedan impactar significativamente a la seguridad de la planta). En base a estos atributos, se clasifican los parámetros en 3 niveles.

En el primer nivel, se encuentran los parámetros que se ha considerado son de mayor relevancia en cuanto su afectación a la seguridad nuclear, por ejemplo, porque aparecen constantemente en los análisis de los eventos, porque se trata de lecciones aprendidas de eventos como Fukushima, o porque las características de Chile los hacen especialmente relevantes.

En el segundo nivel, hay los parámetros que, aun siendo de importancia para la seguridad nuclear, se ha considerado que están un peldaño por debajo de los del primer nivel.

En el tercer nivel hay los parámetros que, aunque deben seguir siendo tenidos en cuenta, se ha considerado que tienen afectaciones en cuanto a la seguridad nuclear menores que los dos anteriores niveles.

Parámetros de primer nivel

<b>1. Emplazamiento</b>
<b>2. Seguridad nuclear de la planta:</b>
<b>2.1. Seguridad básicamente activa, seguridad básicamente pasiva, o una combinación entre ambas.</b>
2.1.1. Seguridad básicamente activa
2.1.2. Seguridad básicamente pasiva
2.1.3. Combinación entre seguridad activa y pasiva
<b>2.2. Defensa en profundidad en el diseño. Barreras múltiples para transitorios, incluyendo:</b>
2.2.1. Principales características de seguridad para limitar los transitorios de la planta;
2.2.2. Características clave de seguridad para evitar daños en el núcleo;
2.2.3. Características clave de seguridad para contener el daño del núcleo;
2.2.4. Características clave de seguridad para reducir la liberación externa de radionúclidos.
<b>2.3. Diversidad, redundancia y separación física:</b>
2.3.1. Trenes redundantes relacionados con la seguridad, segregados en diferentes salas; e.g. sistemas de aporte de agua, sistemas de refrigeración alternativos, sistemas eléctricos o sistemas de refrigeración alimentados con vapor;
2.3.2. Principales Estructuras, sistemas y componentes relacionados con la seguridad diseñados contra daños causados por la acción humana, así como contra eventos externos naturales, incluyendo inundaciones internas y externas;

Condiciones necesarias para la implementación segura de un programa nuclear de potencia en Chile.  
INFORME FINAL

2.3.3. Separación de trenes redundantes y componentes principales, así como la compartimentación de sistemas relacionados con la seguridad y no relacionados con la seguridad;

**2.4. Defensa contra eventos externos.**

- Inundaciones externas
- Deslizamientos de tierra
- Hundimiento/ alzamiento del terreno
- Tsunamis
- Actividad volcánica
- Terremotos

Para todos estos eventos externos (existen más eventos a considerar, estos serían los más relevantes), son necesarios:

- Márgenes en los cálculos de las bases de diseño;

**2.5. Liberaciones en accidentes severos y respuestas ante estos accidentes:**

- 2.5.1. Programas, procedimientos de gestión de accidente severo;
- 2.5.2. Diseño de la contención (e.g. contención doble con revestimiento);
- 2.5.3. Diseño del punto de fallo por sobrepresión de contención y penetraciones;
- 2.5.4. Gestión después de daño al núcleo (e.g. retención en la vasija);
- 2.5.5. Gestión del hidrógeno (e.g. recombinadores);
- 2.5.6. Venteo filtrado de la contención;
- 2.5.7. Centro de soporte técnico para emergencias;

**2.6. Alcance, madurez y resultados de la evaluación probabilística de la seguridad (PSA):**

- 2.6.1. Comparaciones de sucesos iniciadores;
- 2.6.2. Eventos internos;
- 2.6.3. Evaluaciones de fuego;
- 2.6.4. Análisis de eventos externos;
- 2.6.5. Grado en que el riesgo está dominado por un único evento (e.g. pérdida de energía fuera del sitio);

**2.7. Disposiciones para garantizar un alto nivel de seguridad:**

- 2.7.1. Interfaz hombre-máquina y diseño de instrumentación y control (I&C);

**2.8. Debida consideración de la ingeniería de factores humanos (incluyendo la accesibilidad a los equipos después de un accidente).**

**2.9. Suministro adicional de combustible y agua para los generadores Diésel, al sistema de agua de alimentación de emergencia y al sistema de reposición al sistema primario.**

**2.10. Integración de las Especificaciones Técnicas de Funcionamiento con el Estudio Final de Seguridad y los Análisis Probabilistas de la Seguridad (PSA).**

**3. Operabilidad, inspección, mantenimiento y fiabilidad**

- 3.1. Procedimientos para operación normal;
- 3.2. Procedimientos para operación en emergencia;
- 3.3. Gestión adecuada de la calidad del proceso de mantenimiento, y en operación; incluye márgenes de operación, fiabilidad de sistemas de control, impacto de intervenciones humanas incorrectas, calidad de la documentación, calidad del entrenamiento, etc.

**4. Transferencia tecnológica y soporte técnico**

Condiciones necesarias para la implementación segura de un programa nuclear de potencia en Chile.

INFORME FINAL

4.1. Programas de apoyo técnico u operacional disponibles a través de contactos del propietario o del operador.
4.2. Programas de apoyo técnico u operacional disponibles a través de los contactos del titular de la tecnología:
4.2.1. Programas de grupos de apoyo a la industria específicos al diseño - a través de WANO, INPO, EUR, EPRI.
<b>5. Cultura de seguridad</b>
5.1. Gestión y liderazgo, organización, sistemas de gestión, comunicación y mejoras de diseño

Parámetros de segundo nivel

<b>1. Interacción con la red eléctrica</b>
<b>2. Seguridad nuclear de la planta:</b>
<b>2.1. Diversidad, redundancia y separación física:</b>
2.1.1. Instalaciones de gestión y control de emergencia separadas, con capacidad para controlar la parada segura en situaciones de emergencia;
2.1.2. Cargas y combinaciones de cargas, incluyendo misiles grandes e impactos de chorro.
<b>2.2. Seguridad de la piscina de combustible gastado:</b>
2.2.1. Localización del edificio e integridad del mismo;
2.2.2. Medios alternativos para la refrigeración y el control de inventario;
2.2.3. Posible almacenamiento en seco del combustible gastado;
<b>2.3. Características de diseño en cuanto a seguridad inherente:</b>
2.3.1. Diseño de reactor inherentemente seguro (e.g. sin coeficientes positivos de temperatura del moderador).
2.3.2. Minimización de ciertos riesgos (e.g. inflamabilidad, criticidad, energía almacenada, reactividad), incorporando medidas de seguridad inherentes (e.g. sistemas pasivos).
<b>2.4. Liberaciones en accidentes severos y respuestas ante estos accidentes:</b>
2.4.1. Grado de implantación de las DEC en el diseño inicial y análisis de BDBA.
<b>2.5. Disposiciones para garantizar un alto nivel de seguridad:</b>
2.5.1. Vida de diseño de la planta y provisiones de sustitución de sistemas relacionados con la seguridad, así como componentes con vida útil prevista más corta;
2.5.2. Disposiciones en el diseño para la estabilidad y capacidad de mantenimiento de sistemas y componentes de seguridad, en particular durante la operación a potencia;
2.5.3. Requisitos de calificación de sistemas y componentes de seguridad;
<b>3. Evaluaciones de los sistemas y componentes principales</b>

Parámetros de tercer nivel

<b>1. Grado de madurez de la tecnología</b>
<b>2. Simplificación</b>
<b>3. Protección radiológica</b>
<b>4. Impacto ambiental</b>

Condiciones necesarias para la implementación segura de un programa nuclear de potencia en Chile.  
INFORME FINAL

### **6.3.2. Parámetros de evaluación de nuevas tecnologías de reactores frente a la seguridad nuclear**

A continuación se incluyen algunas de las distintas tecnologías de reactores actuales, resaltando aquellos parámetros sobre la seguridad que la tecnología en cuestión ha desarrollado por encima de otros parámetros respecto a las otras tecnologías, o respecto a las tecnologías de reactores anteriores a los nuevos reactores.

#### **EPR (Areva)**

Los reactores de Generación III+ de Areva, EPR (*European Pressurized Reactor* ó *Evolutionary Pressurized Reactor*), son uno de los reactores más potentes disponibles, con una potencia eléctrica neta de 1600 MWe.

##### 1. Aplicación de los conceptos de redundancia y separación física:

El EPR cuenta con cuatro sistemas de refrigeración de emergencia del núcleo independientes.

Cada uno de estos 4 trenes es capaz de proporcionar el 100% de la función de seguridad requerida para llevar la planta a parada segura, así como el posterior enfriamiento del núcleo.

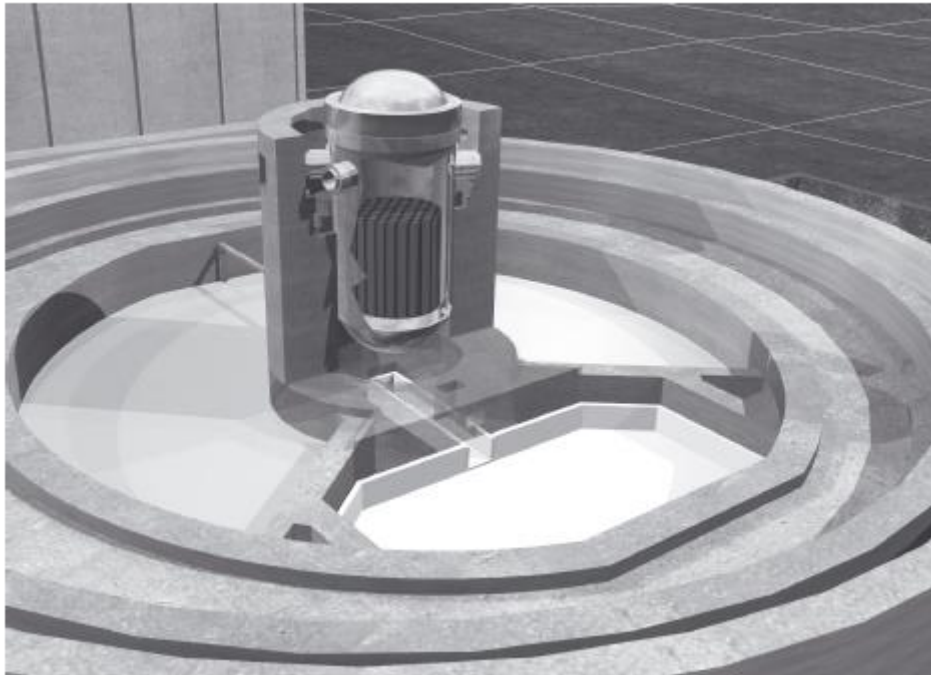
La protección adicional proviene de la separación física de cada uno de los trenes, situados en edificios independientes [12].

##### 2. Introducción de sistemas y/o elementos para hacer frente a la fusión del núcleo (pasivos), exvessel

###### 2.1. Sistema de captura del núcleo

El concepto básico del EPR para la estabilización del corium (núcleo fundido) es su “derrame” en un gran compartimento lateral, a lo cual le seguirían los procesos de inundación y enfriamiento con agua, la cual sería drenada de forma pasiva por gravedad de un depósito interno.

Condiciones necesarias para la implementación segura de un programa nuclear de potencia en Chile.  
INFORME FINAL



**Ilustración 3: Localización de la zona de derrame del núcleo fundido (área rectangular). Fuente: [12]**

Este sistema de retención del núcleo fundido “exvessel”, i.e. fuera de la propia vasija, supondría una barrea física adicional para impedir la liberación de radionúclidos al medio ambiente [12].

## 2.2. Sistema de recombinadores de hidrógeno

Para impedir que el hidrógeno liberado fuera de la vasija en caso de accidente severo con fusión del núcleo, provocara explosiones dentro del edificio de contención, existen una serie de recombinadores de hidrógeno.

## 3. Análisis probabilistas de seguridad

Este reactor tiene un valor de frecuencia de daño al núcleo, o *Core Damage Frequency* (CDF) de  $6,1 \times 10^{-7}$  (eventos por reactor-año) [12], frente a valores de CDF del orden de  $10^{-5}$  de los reactores de Generación II [13].

### **AP1000 (Westinghouse)**

Los reactores de Generación III+ de Westinghouse, AP1000, son los nuevos reactores de este fabricante. Tiene una potencia eléctrica de 1117 MWe. La vasija del reactor es la misma que las

Condiciones necesarias para la implementación segura de un programa nuclear de potencia en Chile.  
INFORME FINAL

de las plantas estándar de 3 lazos de Westinghouse, pero disponen de una serie de características innovadoras en cuanto a la seguridad se refiere.

1. Introducción de sistemas de seguridad pasivos de actuación automática. Reducción del factor humano.

Estos reactores disponen de [12]:

- Sistema de inyección de seguridad pasivo, mediante:
  - o Tanques de reposición al núcleo. Sustituyen a las actuales bombas de inyección de alta presión.
  - o Acumuladores. Similares a las plantas actuales.
  - o Tanque de almacenamiento de agua de recarga dentro de contención (*In-containment Refueling Water Storage Tank, IRWST*). Sustituyen a las actuales bombas de inyección de baja presión.
- Sistema de extracción de calor residual pasivo (no son necesarias las bombas actualmente presentes en el *RHR*).
- Sistema de refrigeración de la contención pasivo (*Passive Containment Cooling System* (PCCS)). Reemplaza a las actuales bombas del sistema de refrigeración de la contención.

En el caso de entrar en pérdida total de corriente alterna, estos sistemas son capaces de actuar sin la intervención de ningún operador durante un periodo de 72 horas [14].

2. Simplificación

Reducción de la complejidad de los sistemas. En el caso del AP1000, se han reducido los metros de tubería del sistema de refrigeración del reactor conectando las bombas del sistema directamente a los generadores de vapor.

Además, los sistemas pasivos anteriormente mencionados son significativamente más simples que los sistemas de seguridad convencionales de centrales PWR. Tienen un número de válvulas remotas, 3 veces menor que en los sistemas activos, y no disponen de ninguna bomba [12].

3. Análisis probabilistas de seguridad

Este reactor tiene un valor de frecuencia de daño al núcleo, o *Core Damage Frequency* (CDF) de  $5,1 \times 10^{-7}$  (eventos por reactor-año) [12], frente a valores de CDF del orden de  $10^{-5}$  de los reactores de Generación II [13].



Condiciones necesarias para la implementación segura de un programa nuclear de potencia en Chile.  
INFORME FINAL

4. Introducción de sistemas y/o elementos para hacer frente a la fusión del núcleo (pasivos) in-vessel

Los reactores AP1000 disponen de un sistema de retención del núcleo fundido, en caso de accidente severo, dentro de la propia vasija del reactor, asegurando de esta manera la integridad de esta barrera para impedir la liberación de productos de fisión al exterior. Ello se consigue refrigerando externamente la vasija del reactor mediante un sistema específicamente diseñado para ello.

**APR1400 (KEPCO)**

Se trata de un reactor de agua a presión diseñado por *Korea Electric Power Corporation* (KEPCO). Tiene una potencia eléctrica de 1400 MWe.

1. Introducción de sistemas de seguridad pasivos.

Los reactores APR1400 disponen de una combinación de sistemas activos y sistemas pasivos, según [15]:

Como sistemas pasivos, estos reactores incorporan:

- Sistema de inundación de la cavidad del reactor

En caso de accidente severo, con fusión del núcleo del reactor, el sistema permite inundar la cavidad del reactor mediante el agua del tanque de almacenamiento de agua de recarga dentro de contención (*In-containment Refueling Water Storage Tank*, IRWST). La función del sistema es enfriar el núcleo fundido, en caso de que el sistema de captura del núcleo no hubiera podido retener el corium dentro de la vasija del reactor.

Como sistemas activos, el APR1400 dispone de:

- Sistema de inyección de seguridad.

2. Introducción de sistemas y/o elementos para hacer frente a la fusión del núcleo (pasivos) in-vessel

2.1. Sistema de captura del núcleo

Los reactores APR1400 disponen de un sistema de retención del núcleo fundido, en caso de accidente severo, dentro de la propia vasija del reactor, asegurando de esta manera la integridad de esta barrera para impedir la liberación de productos de fisión al exterior. Ello se consigue refrigerando externamente la vasija del reactor mediante un sistema específicamente diseñado para ello. Es un sistema activo.

Condiciones necesarias para la implementación segura de un programa nuclear de potencia en Chile.  
INFORME FINAL

## 2.2. Sistema de recombinadores de hidrógeno

Para impedir que el hidrógeno liberado fuera de la vasija en caso de accidente severo con fusión del núcleo, provocara explosiones dentro del edificio de contención, existen una serie de recombinadores de hidrógeno.

## 3. Análisis probabilistas de seguridad

Este reactor tiene un valor de frecuencia de daño al núcleo, o *Core Damage Frequency* (CDF) de  $2,7 \times 10^{-6}$  (eventos por reactor-año) [12], frente a valores de CDF del orden de  $10^{-5}$  de los reactores de Generación II [13].

### **VVER-1200 (AES2006) (Gidopress)**

Los reactores de Generación III+ de Gidopress (Rusia), VVER1200, son los nuevos reactores de este fabricante. Tiene una potencia eléctrica de 1170 MWe.

#### 1. Introducción de sistemas de seguridad pasivos.

Los reactores VVER1200 disponen de una combinación de sistemas activos y sistemas pasivos, según [16] y [17]:

- Sistemas de seguridad para hacer frente a accidentes dentro de las bases de diseño:
  - Inyección de seguridad: activa
  - Refrigeración de emergencia del núcleo: activa
  - Refrigeración de la contención: Activa
- Sistemas de seguridad para hacer frente a accidentes dentro y más allá de las bases de diseño:
  - Dentro de las bases de diseño:
    - Refrigeración de emergencia del núcleo mediante acumuladores: pasivo.
    - Sistema de extracción de hidrógeno: pasivo.
    - Doble contención: pasivo.

Condiciones necesarias para la implementación segura de un programa nuclear de potencia en Chile.  
INFORME FINAL

- Más allá de las bases de diseño:
  - Sistema de “captación” del núcleo: pasivo
  - Extracción de calor a través de los generadores de vapor: pasivo.
  - Extracción de calor a través de la contención: pasiva.
  - Sistema de recombinadores de hidrógeno: pasivo

## 2. Análisis probabilistas de seguridad

Este reactor tiene un valor de frecuencia de daño al núcleo, o *Core Damage Frequency* (CDF) de  $4,2 \times 10^{-7}$  (eventos por reactor-año) [17], frente a valores de CDF del orden de  $10^{-5}$  de los reactores de Generación II [13].

### **ABWR (GE, Hitachi, Toshiba)**

Los reactores de Generación III de General Electric, Toshiba y Hitachi llamados ABWR (*Advanced Boiling Water Reactor*), fueron los primeros reactores de Generación III en entrar en funcionamiento, el año 1996.

#### 1. Introducción de sistemas y/o elementos para hacer frente a la fusión del núcleo (pasivos) ex-vessel

El reactor ABWR presenta un suelo basáltico con características de enfriamiento pasivo, diseñado para detener el flujo de *corium* en el caso de una fusión del núcleo.

#### 2. Grado de madurez de la tecnología

La tecnología de los reactores ABWR está probada y cuenta con varios años de experiencia operativa. El primer reactor ABWR empezó a funcionar en el año 1996.

#### 3. Análisis probabilistas de seguridad

Este reactor tiene un valor de frecuencia de daño al núcleo, o *Core Damage Frequency* (CDF) de  $1,6 \times 10^{-7}$  (eventos por reactor-año) [12], frente a valores de CDF del orden de  $10^{-5}$  de los reactores de Generación II [13].

Condiciones necesarias para la implementación segura de un programa nuclear de potencia en Chile.  
INFORME FINAL

## 7. SISMOLOGÍA E IMPACTO EN LA SEGURIDAD DE CENTRALES NUCLEOELÉCTRICAS

La alta actividad sísmica de Chile es tal vez el factor de riesgo más importante a la hora de analizar la opción nuclear. Chile es una de las tres naciones más sísmicas del mundo, de hecho es donde se ha experimentado el movimiento telúrico más fuerte a nivel mundial desde que existen registros; el terremoto de Valdivia (año 1960), que tuvo una magnitud de 9.5, es quien ostenta el record. Para tener una idea de lo que esto significa, hay que recordar el sismo del año 1985, que afectó principalmente a la regiones Quinta y Metropolitana, el cual registró una magnitud de 7.7; o el gran terremoto de junio del 2005 ocurrido en el norte grande, el cual anotó una magnitud de 7.9. (...) Otra de las naciones sísmicas que integran la lista es Japón, el cual es azotado por grandes terremotos con un promedio muy similar al de Chile [18].

Las instalaciones nucleares están diseñadas para que los terremotos y otros eventos externos no pongan en peligro la seguridad de la planta. En Francia, por ejemplo, las centrales nucleares están diseñadas para soportar un sismo dos veces superior al sismo calculado para cada emplazamiento con un periodo de retorno de 1000 años. En Japón, debido a la frecuencia y magnitud de los eventos sísmicos, se presta una especial atención en torno al tema sísmico en el emplazamiento, el diseño y la construcción de las centrales nucleares. El diseño sísmico de estas plantas, se basa en criterios mucho más estrictos que los que se aplican a otras instalaciones no nucleares. Las centrales nucleares se construyen también en rocas asentamientos rocosos duros (no en sedimentos) para minimizar las vibraciones debidas a los sismos. A título de ejemplo, la planta de reprocesado de Rokkasho, en Japón, está construida encima de una roca estable, y está diseñada para resistir sismos de una magnitud 8.25 (según indica la *World Nuclear Association*, WNA, “*Nuclear Power Plants and Earthquakes*” [19]).

Se estima que, en todo el mundo, el 20% de los reactores nucleares están operando en áreas de actividad sísmica significativa. La Agencia Internacional de Energía Atómica (OIEA) tiene una Guía de seguridad sobre riesgos sísmicos para centrales nucleares. Varios sistemas se utilizan en la planificación, incluida la evaluación probabilística del peligro sísmico (PSHA), recomendada por el OIEA y ampliamente aceptada [19].

El documento SSG-9 del OIEA, [20], sobre la “Evaluación de Peligros sísmicos en la evaluación del emplazamiento para instalaciones nucleares”, proporciona información relevante para los estudios y análisis necesarios a la hora de caracterizar un emplazamiento para una instalación nuclear, teniendo en consideración los riesgos sísmicos a los que esta instalación puede estar sujeta.

Condiciones necesarias para la implementación segura de un programa nuclear de potencia en Chile.  
INFORME FINAL

Adicionalmente, el documento NS-G-1.6 del OIEA [21], “Diseño y calificación sísmica para centrales nucleares”, proporciona información sobre recomendaciones de métodos generalmente aceptados para el diseño de centrales nucleares, de manera que un sismo en el emplazamiento no comprometa la seguridad de la planta.

Asimismo, existen varios documentos elaborados por la *Nuclear Regulatory Commission* (NRC, organismo regulador americano) que tratan específicamente el tema de la sismología y su afectación a las centrales nucleares, así como de la *Nuclear Regulation Authority* (NRA, organismo regulador japonés).

## **7.1. Listado de eventos sísmicos**

A continuación se presentan, en orden cronológico, una serie de eventos sísmicos recogidos a lo largo de la historia, que han provocado movimientos del terreno en emplazamientos con centrales nucleares. Se determina también si el movimiento del terreno en el emplazamiento tuvo algún tipo de consecuencia sobre la seguridad de las centrales afectadas.

### **Sismo en Spitak, Armenia, en 1988 (Magnitud 6.9)**

En el año 1988, se registró en Spitak, Armenia, un sismo de magnitud 6.9, el cual provocó un movimiento del terreno en el emplazamiento dónde está ubicada la central nuclear de Metsamor, de tecnología VVER-440/270.

Los reactores continuaron su operación normalmente, sin daño alguno, a pesar de que las aceleraciones observadas debido al terremoto fueron mayores que las previstas en el diseño. No hubo disparo de los reactores, al ser las señales registradas inferiores al valor umbral de disparo.

### **Sismo en Honshu Island, Japón, en 1993 (Magnitud 5.8)**

En el año 1993, se registró en Honshu Island, Japón, un sismo de magnitud 5.8, el cual provocó un movimiento del terreno en el emplazamiento dónde está ubicada la central nuclear de Onagawa-1. El reactor se detuvo automáticamente, como consecuencia del sismo, no habiéndose evidenciado ninguna afectación en la seguridad de la planta adicional.

### **Sismo en Hokkaido, Japón, en 1993 (Magnitud 7.8)**

En el año 1993, se registró en Hokkaido, Japón, un sismo de magnitud 7.8, el cual provocó un movimiento del terreno en el emplazamiento dónde está ubicada la central nuclear de Tomari 1 y 2. Los reactores continuaron su operación normalmente.

### **Sismo en el norte de Japón, en 1994 (Magnitud 7.5)**

Condiciones necesarias para la implementación segura de un programa nuclear de potencia en Chile.  
INFORME FINAL

En el año 1994, se registró en el norte de Japón, un sismo de magnitud 7.5, el cual provocó un movimiento del terreno en el emplazamiento dónde están ubicadas 11 centrales nucleares de tipo BWR que estaban operando en la zona. No se registró ningún daño en estas centrales a resultas del evento sísmico.

#### **Sismo en California, Estados Unidos, en 1994 (Magnitud 6.6)**

En el año 1994, se registró en la zona de California un sismo de magnitud 6.6, el cual provocó un movimiento del terreno en el emplazamiento dónde están ubicadas las centrales nucleares de San Onofre 2 & 3 y Diablo Canyon. Los reactores continuaron su operación normalmente.

#### **Sismo en Kobe, Japón, en 1995 (Magnitud 7.2)**

En el año 1995, se registró en la zona de Kobe, Japón, un sismo de magnitud 7.2, el cual provocó un movimiento del terreno en el emplazamiento dónde están ubicadas las centrales nucleares de Takahama, Ohi, así como otras centrales dentro de un radio de 200 km respecto al epicentro del sismo. Ninguna de las plantas nucleares dentro de este radio de 200 km respecto al epicentro del sismo, tuvieron daños significativos, e incluso aquellos reactores que estaban operando en aquél momento continuaron con su operación. Este terremoto, devastó la zona de Kobe.

#### **Sismo en Ji-Ji, Taiwan, en 1999 (Magnitud 7.6)**

En el año 1999, se registró en la zona de Ji-Ji, Taiwan, un sismo de magnitud 7.6, el cual provocó un movimiento del terreno en el emplazamiento dónde están ubicadas las centrales nucleares de Chinshan, Kuosheng, y Maanshan. El sismo provocó una gran pérdida de vidas humanas. Los reactores detuvieron su operación inmediatamente. 2 días después del sismo, los reactores de Kuosheng y Chinshan reanudaron su operación, y los 2 reactores de Maanshan siguieron operando con normalidad.

#### **Sismo en Miyagi, Japón, en 2003 (Magnitud 7.0)**

En el año 2003, se registró en Miyagi, Japón, un sismo de magnitud 7.0, el cual provocó un movimiento del terreno en el emplazamiento dónde está ubicada la central nuclear de Onagawa. Se activaron los actuadores automáticos, y el reactor disparó automáticamente (SCRAM) debido a las aceleraciones detectadas.

En este caso las aceleraciones observadas durante el sismo fueron inferiores a las aceleraciones previstas en el diseño, según indica el documento [22].

#### **Sismo en Niigata, Japón, en 2004 (Magnitud 6.8)**

Condiciones necesarias para la implementación segura de un programa nuclear de potencia en Chile.  
INFORME FINAL

En el año 2004, se registró en Niigata, Japón, un sismo de magnitud 6.8, el cual provocó un movimiento del terreno en el emplazamiento dónde está ubicada la central nuclear de Kashiwazaki-Kariwa. Los reactores continuaron su operación normalmente.

#### **Sismo en Niigata, Japón, en 2004 (Magnitud 5.2)**

También en el año 2004, se registró en Niigata, Japón, un sismo de magnitud 5.2, el cual provocó un movimiento del terreno en el emplazamiento dónde está ubicada la central nuclear de Kashiwazaki-Kariwa. En este caso disparó uno de los reactores, no habiéndose evidenciado daño alguno en la seguridad de la planta.

#### **Sismo en California, Estados Unidos, en 2005 (Magnitud 6.5)**

En el año 2005, se registró en la zona de California un sismo de magnitud 6.5, el cual provocó un movimiento del terreno en el emplazamiento dónde están ubicadas las centrales nucleares de Diablo Canyon. Los reactores continuaron su operación normalmente, no habiéndose evidenciado daño alguno en la seguridad de la planta.

#### **Sismo en Honshu Island, Japón, en 2005 (Magnitud 7.2)**

En el año 2005, se registró en Honshu Island, Japón, un sismo de magnitud 7.2, el cual provocó un movimiento del terreno en el emplazamiento dónde está ubicada la central nuclear de Onagawa. Dispararon los 3 reactores automáticamente, sin daño alguno. Los reactores fueron llevados a parada segura, tal y como estaba previsto en su diseño. Los 3 reactores fueron arrancando sucesivamente (El grupo 1, en mayo de 2007, el grupo 2 en enero de 2006, y el grupo 3 marzo de 2006).

#### **Sismo en Kyushu, Japón, en 2005 (Magnitud 7.0)**

En el año 2005, se registró en Kyushu, Japón, un sismo de magnitud 7.0, el cual provocó un movimiento del terreno en el emplazamiento dónde está ubicada las centrales nucleares de Genkai, Sendai, Shimane, e Ikata. No se registró ningún daño en estas centrales a resultados del evento sísmico.

#### **Sismo en Niigata, Japón, en 2007 (Magnitud 6.8)**

En el año 2007, se registró en Niigata, Japón, un sismo de magnitud 6.8, el cual provocó un movimiento del terreno en el emplazamiento dónde está ubicada la central nuclear de Kashiwazaki-Kariwa. No hubo daño en ninguno de los 7 reactores, a pesar de que las aceleraciones observadas debido al terremoto fueron mayores que las previstas en el diseño. Los reactores fueron llevados a parada seguro, tal y como estaba previsto en su diseño. Ello llevó a una reevaluación de los criterios de diseño y criterios sísmicos.

Condiciones necesarias para la implementación segura de un programa nuclear de potencia en Chile.  
INFORME FINAL

### **Sismo en la península de Noto, Japón, en 2007 (Magnitud 6.9)**

En el año 2007, se registró en la península de Noto, Japón, un sismo de magnitud 6.9, el cual provocó un movimiento del terreno en el emplazamiento dónde está ubicada la central nuclear de Shika. No hubo daño en la central y se mantuvieron todas las funciones de seguridad. La única afectación que hubo, fue el derrame de 45 litros de agua de la piscina de combustible gastado de la unidad 1.

### **Sismo en Sichuan, China, en 2008 (Magnitud 7.9)**

En el año 2008, se registró en Sichuan, China, un sismo de magnitud 7.9, el cual provocó un movimiento del terreno en el emplazamiento dónde están ubicados varios reactores de investigación, militares y también comerciales. No se registraron daños a resultados del sismo.

### **Sismo en el norte de Japón, en 2010 (Magnitud 6.2)**

En el año 2010, se registró en el norte de Japón, un sismo de magnitud 6.2, el cual provocó un movimiento del terreno en el emplazamiento dónde están ubicadas las 13 centrales nucleares que estaban operando en la zona (i.e. Fukushima I&II, y Onagawa). Ninguno de los 13 reactores resultó dañado a resultados del evento sísmico.

### **Sismo en Virginia Central, Estados Unidos, en 2011 (Magnitud 5.8)**

En el año 2011, se registró en Virginia Central, Estados Unidos, un sismo de magnitud 5.8, el cual provocó un movimiento del terreno en el emplazamiento dónde está ubicada la central nuclear de North Anna. El sismo se registró a 11 millas de la planta. Aunque la planta experimentó aceleraciones superiores a las que estaban previstas para la zona, todos los sistemas estuvieron protegidos, y actuaron según lo previsto en su diseño para mantener las funciones de seguridad. No hubo daños.

### **Sismo en Honshu Island, Japón, en 2011 (Magnitud 9.0)**

En el año 2011, se registró en Honshu Island, Japón, un sismo de magnitud 9.0, el cual provocó un movimiento del terreno en el emplazamiento dónde están ubicadas las centrales nucleares de Fukushima y Onagawa.

La central nuclear de Onagawa, resistió tanto el sismo como el tsunami posterior. Esta central fue la que más cerca estuvo del epicentro del terremoto, y fue llevada a parada segura, sirviendo incluso como refugio para las personas que tuvieron que desplazarse debido al tsunami.

En la central de Fukushima, cuando el terremoto fue detectado, las unidades 1, 2 y 3 pararon automáticamente según estaba previsto en el diseño. Aunque las aceleraciones observadas debido al terremoto fueron mayores que las previstas en el diseño, no hubo ninguna indicación



Condiciones necesarias para la implementación segura de un programa nuclear de potencia en Chile.  
INFORME FINAL

de que las principales características de seguridad de la central se vieran afectadas por los movimientos vibratorios de la tierra generados por el terremoto. Ello se debió al enfoque prudente aplicado en el Japón con respecto a los terremotos al diseñar y construir centrales nucleares, lo que dio lugar a una central con márgenes de seguridad suficientes.

No obstante, las consideraciones del diseño originario no preveían márgenes de seguridad comparables para sucesos de inundación externa extremos, como los tsunamis.

Tanto los reactores de Fukushima Daiichi como los de Fukushima Daini, así como los de Onagawa, resistieron estructuralmente el sismo.

Este sismo fue el más potente jamás registrado en Japón, y el cuarto sismo más intenso registrado a escala global.

### **Sismo en Irán, en 2013 (Magnitud 7.7)**

En el año 2013, se registró en Irán, un sismo de magnitud 7.7, el cual provocó un movimiento del terreno en el emplazamiento dónde está ubicada la central nuclear de Bushehr. Según se reportó al OIEA no hubo ningún daño, aunque posteriormente se reportaron algunas grietas en el hormigón. La central está diseñada para sismos de magnitud 8.0.

## **7.2. Conclusiones de los eventos sísmicos y su afectación a las centrales nucleares**

Como conclusión a lo expuesto en el apartado 7.1, considerando el conjunto de eventos sísmicos que han provocado movimientos del terreno en emplazamientos con centrales nucleares a lo largo de las últimas décadas, puede extraerse que no ha habido ningún sismo registrado de cierta magnitud (ni de altas intensidades), ni cuando las aceleraciones que éste ha provocado han sido mayores que las aceleraciones previstas en el diseño, el cual haya comprometido o afectado la seguridad de las centrales nucleares, en ninguna de las barreras físicas establecidas en la defensa en profundidad, ni en ninguna de las funciones fundamentales de seguridad:

- Barreras físicas:
  - 1ª barrera: Pastillas Combustible
  - 2ª barrera: Vainas Combustible
  - 3ª barrera: Barrera a presión del Primario
  - 4ª barrera: Contención
- Funciones de Seguridad

Condiciones necesarias para la implementación segura de un programa nuclear de potencia en Chile.  
INFORME FINAL

- Control de la reactividad
- Extracción de calor del combustible
- Confinamiento del material radiactivo

Habiéndose mantenido siempre íntegras las barreras, y realizadas correctamente las funciones de seguridad.

Ello da fe de que, aún incluso en zonas altamente sísmicas como puede ser Chile, el diseño, la construcción y la operación segura de centrales nucleares es plenamente posible, teniendo en cuenta los criterios tecnológicos adecuados a este factor, como por ejemplo contar con la información de fallas sísmológicas y estudios de mecánica de suelos en el emplazamiento, así como una selección adecuada del emplazamiento.

En este sentido, Chile dispone ya de una normativa de diseño sísmico específica, a través de varias normas, como son:

- NCh 433, de “Diseño Sísmico de Edificios”,
- NCh 2369, de “Diseño Sísmico de Estructuras e Instalaciones Industriales”,
- NCh 2745, de “Análisis y Diseño Sísmico de Edificios con Aislación Sísmica”.

Lo cual hace que Chile sea un País con una gran y vasta experiencia, y robustez respecto al diseño sísmico, diseño que además ha demostrado ser eficaz, como quedó manifestado por ejemplo en las plantas eléctricas de Tocopilla, cuando después de un sismo de magnitud 7.7 en el año 2007, éstas continuaron con su operación, o por ejemplo el año 2010 en el metro de Santiago, el cual continuó con su operación a las pocas horas del movimiento registrado como consecuencia del sismo (tal y como refleja el documento *Generación Núcleo-Eléctrica en Chile: Hacia una Decisión Racional* [23]).

Por lo tanto, será necesario para Chile decidir cuál será la metodología a seguir para poder definir los análisis de las vulnerabilidades sísmicas del emplazamiento dónde se ubique la central nuclear, así como los criterios de diseño de ésta frente a los sismos, y de qué manera se debería actualizar, modificar o adaptar la actual normativa de diseño sísmico a tal efecto.

Atendiéndose a la recomendación de la guía de seguridad específica del OIEA, SSG-9 [20], es conveniente realizar el análisis de vulnerabilidad frente a sismos, a través de un proyecto específico, para el cual se disponga de unos objetivos claros y detallados, y éste debe llevar asociado un plan de trabajo. Este proyecto se debería llevar a cabo a través de un equipo multidisciplinar formado por expertos en varios campos, como la geología, la sismología, la geofísica, la ingeniería y posiblemente otras áreas (como la historia).

Condiciones necesarias para la implementación segura de un programa nuclear de potencia en Chile.  
INFORME FINAL

## **8. EVALUACIÓN DEL ESTADO ACTUAL DE LA INFRAESTRUCTURA NUCLEAR DE CHILE EN MATERIA DE SEGURIDAD.**

### **8.1. El OIEA y las necesidades de infraestructura de seguridad nuclear**

Desde su creación, el OIEA ha prestado soporte y orientación a aquellas naciones en vías de desarrollo de programas nucleares de potencia (PNP) para el uso pacífico de la energía nuclear. En esta línea de trabajo, el OIEA ha provisto de guías para facilitar la implantación y seguimiento de las actividades necesarias desde el punto de vista de la seguridad para garantizar que se cumplen y estandarizan los requisitos. A este respecto, en 2016 dicho organismo publicó *Establishing the Safety Infrastructure for a Nuclear Power Programme* No. SSG-16 [1] donde se detallan, distribuidos en forma de 20 requisitos generales, aquellos hitos para el establecimiento de la infraestructura de seguridad de que debe constar un programa de nucleoelectrónico.

En el año 2017, y como parte de las evaluaciones que se llevan a cabo en Chile durante los últimos años, se ha realizado un análisis de los requisitos de seguridad establecidos en la guía SSG-16 [1] del OIEA. El objeto de este trabajo es el de continuar proveyendo datos para la valoración futura sobre la posibilidad de implantación de un programa de nucleoelectricidad. El informe “IIT-002 - Estudio para identificar las brechas nacionales y propuesta de acciones en materia de seguridad (OE2)” [24] presenta el resultado de este análisis.

El proceso seguido para este trabajo ha constado de una etapa inicial centrada en el levantamiento del estado y capacidades actuales de que Chile dispone actualmente con respecto a cada uno de los requisitos de infraestructura de seguridad delineados por el OIEA. Dado el estadio preliminar en que se encuentra el país actualmente, el análisis se ha centrado en aquellos requisitos que serán demandados en caso de que Chile entrara en el proceso hacia la toma de decisión, correspondiente a la Fase 1 según los estándares del OIEA (ver Ilustración 4: ):

1. Política y estrategia nacional en pos de la seguridad.
2. Régimen de seguridad nuclear global.
3. Marco legal.
4. Marco regulatorio.
5. Transparencia.
6. Financiación.

Condiciones necesarias para la implementación segura de un programa nuclear de potencia en Chile.  
INFORME FINAL

7. Organizaciones y contratistas externos de soporte.
8. Liderazgo y gestión para la seguridad.
9. Desarrollo de recursos humanos.
10. Investigación para propósitos regulatorios y de seguridad.
11. Protección radiológica.
12. Evaluación de seguridad.
13. Seguridad en gestión de residuos radiactivos, combustible gastado y desmantelamiento.
14. Preparación y respuesta ante emergencias.
15. Organización operadora de la planta.
16. Selección y evaluación de emplazamientos.
17. Seguridad del diseño.
18. Preparación para la puesta en marcha.
19. Seguridad en el transporte.
20. Interfase con la seguridad nuclear.

## 8.2. El estado de la infraestructura de seguridad nuclear de Chile

El desarrollo de las capacidades en materia de seguridad nuclear ha sido principalmente impulsado por la Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN) desde su creación. Las actividades que tanto el Gobierno de la República como la Comisión realizan desde los años 60, han permitido el desarrollo de una base entorno a la cual crear toda la infraestructura. El principal eje vertebrador lo conforma la Ley de Seguridad Nuclear [25], establecida en su primera versión el año 1984, y a través de la cual se legislan de forma general todas las actividades e instalaciones radiactivas y nucleares del país.

El OIEA, y en general la industria nuclear, hacen especial énfasis en el concepto de **Seguridad**, lo que hace necesaria su integración en todos los procesos que un país lleva a cabo. En este contexto, la definición de una **Política y Estrategia nacional** son claves para garantizar que tanto las organizaciones participantes como sus actividades consideran como principal premisa

Condiciones necesarias para la implementación segura de un programa nuclear de potencia en Chile.  
INFORME FINAL

la Seguridad, y que ella se transmite culturalmente desde los estamentos de mayor nivel. El rol del Gobierno en las etapas iniciales, y concretamente en la que se encuentra Chile, es principal importancia debido a que establece las bases sobre las cuales se conformará toda la estructura. El Gobierno de Chile ha demostrado históricamente la seguridad nuclear como uno de sus pilares fundamentales y, mediante la creación de la Ley de Seguridad Nuclear [25], ha demostrado su compromiso para/con la misma. Como fruto de ello, ha requerido la realización de diversos estudios para disponer de todos los datos necesarios para una futura decisión informada sobre si apostar o no por la generación nucleoelectrónica.

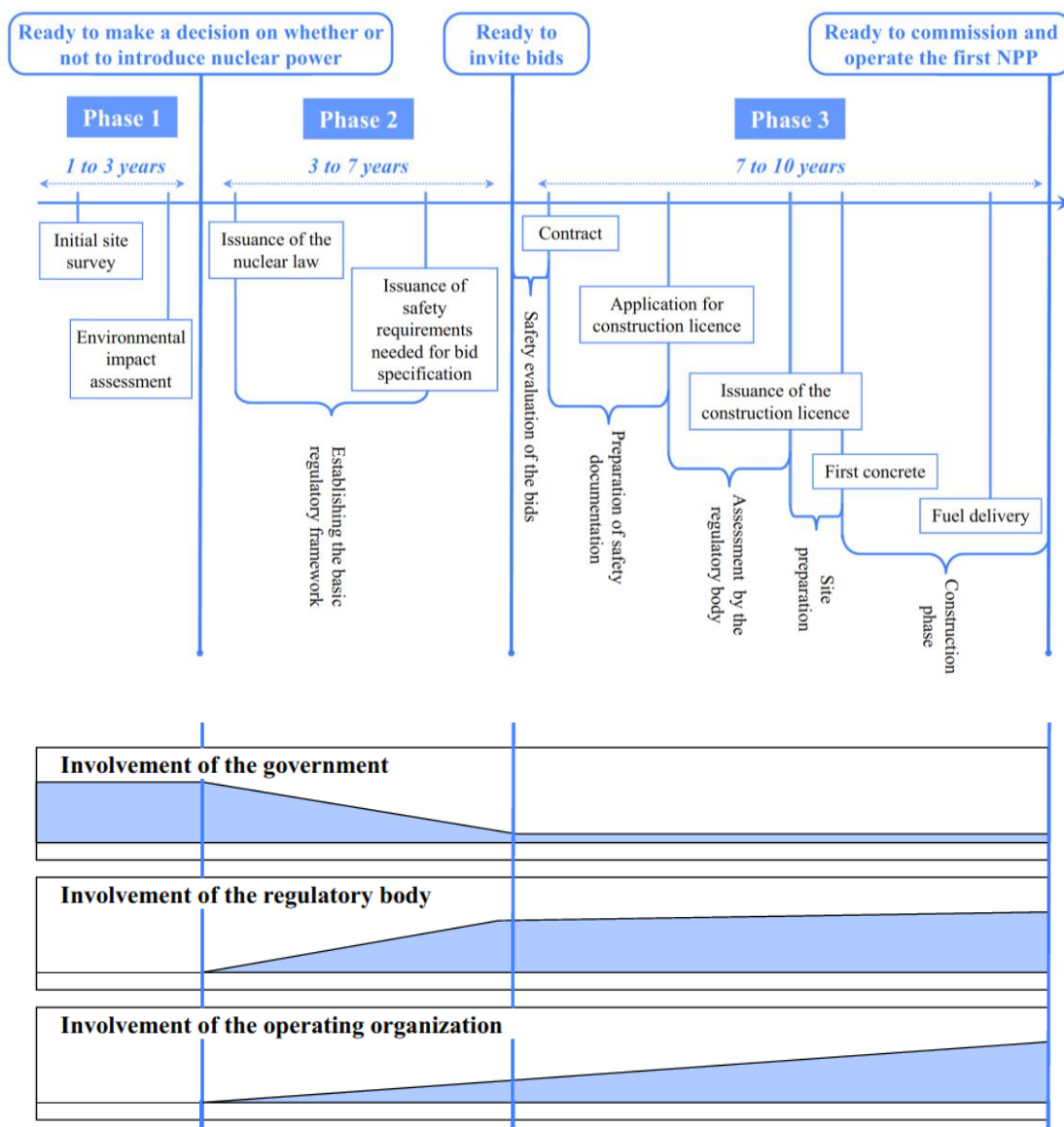


Ilustración 4: Fases consideradas por el OIEA en SSG-16 [1]

Condiciones necesarias para la implementación segura de un programa nuclear de potencia en Chile.  
INFORME FINAL

En la actualidad, la política energética chilena [2] no contempla el uso de la energía nucleoelectrica en el horizonte cercano, si bien presenta un claro hito de disponer de toda la información en 2020 para la toma de decisión acerca de si incluir o no la generación nuclear dentro de la matriz energética en el futuro a medio plazo de Chile. El crecimiento en la demanda energética que afronta el país para los próximos años requiere tener en consideración todas aquellas potenciales fuentes de suministro que, adicionalmente a ayudar a cubrir las necesidades, incrementen la seguridad de la nación por medio de la garantía de suministro y la sostenibilidad. La energía nucleoelectrica se posiciona como una fuente fiable, que estabiliza los costes de generación, reduce el uso de Gas Natural Licuado (GNL) y carbón, reduce la emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI), por lo que conforma un buen complemento de las Energías Renovables como motor de desarrollo económico y tecnológico. El Gobierno de la República es consciente de ello, y ha demostrado su lineamiento con llevar a cabo aquellos estudios que sean necesarios para tomar una decisión bien informada, pero no espera un posicionamiento hasta ese momento.

La CCHEN, por su política institucional, es la encargada de promover la Seguridad durante todo el proceso, si bien durante el trabajo desarrollado en informe IIT-002 [24] se ha identificado la necesidad de una mayor participación del Gobierno en la provisión de recursos personales y económicos específicos para el desarrollo de la infraestructura de Seguridad, recursos que actualmente se comparten con otras actividades de la CCHEN. Adicionalmente, el desarrollo de una concienciación gubernamental sobre las implicaciones del uso de la energía nuclear en materia de impacto radiológico y de costes asociados a un programa nuclear de potencia se ha identificado como un área de trabajo fundamental para Chile en el medio plazo.

Durante la realización de los trabajos, se ha prestado especial atención a la presencia de Chile en el **Régimen de seguridad nuclear global**. En materia de seguridad nuclear y seguridad física, dos pilares esenciales de la infraestructura de seguridad, debe comprenderse el carácter transfronterizo de las actividades debido a la afectación que pueden tener más allá de los límites físicos del territorio. Para ello, los organismos internacionales (OIEA, OECD, etc.) han promovido la creación de tratados y compromisos internacionales para la adhesión de sus estados miembros, mediante los cuales se garantizan unos estándares comunes de responsabilidad ante accidentes así como mecanismos de cooperación entre naciones para el apoyo en casos de emergencia. La adhesión y seguimiento de dichos tratados garantiza que, adaptados a la legislación propia de cada país, se cumplan los requisitos mínimos de seguridad nuclear y protección radiológica.

---

Condiciones necesarias para la implementación segura de un programa nuclear de potencia en Chile.  
INFORME FINAL

Cabe destacar el papel activo de Chile en la adhesión e integración de tratados y cooperaciones internacionales, que le sitúa en un estadio muy avanzado según lo esperado por el OIEA en la Fase 1 (en cual Chile no se encuentra aún). En la actualidad Chile ha ratificado los principales tratados internacionales de OIEA y dispone de diversos acuerdos bilaterales de cooperación para el uso pacífico de la energía nuclear, si bien en esto último se considera necesario potenciar la cooperación específica en materia de seguridad nuclear y transfronteriza. A este respecto, Chile debe iniciar las conversaciones con los países vecinos con el fin de recoger sus apreciaciones respecto a una potencial implantación futura de un programa de generación nucleoelectrónica. La aceptabilidad y colaboración son fundamentales en las etapas de toma de decisión, y para ello se considera necesario el establecimiento de acciones para establecer vías de comunicación y recoger las preocupaciones y posturas más allá de las fronteras, tanto en estados vecinos como en otros de interés por el estado de los programas nucleares propios.

El **Marco Legal y Regulatorio** en los procesos de levantamiento de infraestructuras de seguridad para programas nucleares de potencia se construye de forma gradual y a la medida de las actividades que se van incorporando. A este respecto, la estructura legal chilena en materia nuclear se encuentra en una fase avanzada, si bien existen acciones abiertas identificadas de relevancia ante una potencial incorporación futura de la generación nucleoelectrónica dentro del mix energético nacional. La Ley de Seguridad Nuclear [25] articula la legislación nacional de las actividades que Chile ha llevado a cabo hasta la actualidad, y deberá ser adaptada para la inclusión de las implicaciones de un PNP que no se encuentran hoy en día cubiertas como la definición de procesos de autorización y licenciamiento de centrales nucleares de potencia.

En materia de Regulación es necesario hacer especial hincapié en la estructura organizativa de que cuenta el país. El OIEA requiere garantías en la regulación mediante la creación de un organismo regulador nuclear (ORN) independiente del resto de procesos. La independencia personal, económica, política y fiscal del ORN es clave para asegurar que se priorizan los criterios de seguridad por encima de cualquier otro factor. A este respecto, la labor institucional de la CCHEN contempla entre otras funciones de promoción y fiscalización, incompatibles según los requisitos establecidos. Dado que Chile no consta actualmente de un ORN que cumpla con los requisitos de independencia requeridos, se ha identificado como una de las acciones a corto plazo que debe resolver el Gobierno de la República para las actividades radioactivas y nucleares que se vienen desarrollando en el territorio nacional. Este organismo deberá además disponer de suficientes recursos para la ejecución de sus actividades de inspección y fiscalización. A nivel Ministerio y la Superintendencia se están alineando las alternativas para resolver próximamente este punto abierto.

---

Condiciones necesarias para la implementación segura de un programa nuclear de potencia en Chile.  
INFORME FINAL

Derivado de lo anterior, el proceso de acercamiento gradual hacia la toma de decisión sobre si apostar o no por la generación nucleoelectrica en Chile debe contar con evaluaciones relativas a las necesidades de tamaño (recursos humanos) y actividades que realizaría el ORN en caso de implantarse un PNP. Las evaluaciones de necesidades futuras son importantes en la etapa preliminar en que se encuentra Chile para garantizar que se provisionan suficientes recursos, y que la escasez de los mismos no pueda suponer la anteposición de ningún otro criterio frente a los requisitos de seguridad.

Un capítulo específico de modificaciones de ámbito legal y regulatorio lo conforma el transporte de material radiactivo y combustible gastado. La ejecución de un programa de energía nuclear requiere el transporte de materiales radiactivos con características específicas, que pueden requerir la modificación o complementar el marco nacional existente para la **Seguridad en el transporte**. Este material radiactivo incluirá el combustible nuclear nuevo y usado y, en función de la estrategia nacional de gestión de residuos radiactivos, el transporte de otros residuos radiactivos puede aumentar considerablemente. En el caso chileno, debido a las infraestructuras radiactivas de que consta Chile, ya dispone de un reglamento para el transporte de materiales radiactivos, el cual tiene en cuenta el diseño, ensayo y transporte de combustible irradiado. Actualmente, la CCHEN está llevando a cabo una revisión del Reglamento de transporte de materiales radiactivos para introducir adaptaciones y mejoras en los procesos

El sector nuclear, debido a su significatividad y repercusión por motivos de seguridad, requiere de especial atención al apartado comunicativo. La **Transparencia** de todos los flujos de información es un concepto capital, requerido por los organismos internacionales, por el cual toda la información se dispone de forma comprensible y adaptada a cada uno de los Grupos de Interés (GDI) participantes del proceso. Estos GDI, entre otros, el público general, industria nacional, centros educativos, medios de comunicación, etc. presentan diferentes necesidades informativas así como diferentes preocupaciones, que deben ser satisfechas en la consecuente medida. El retorno de sus percepciones, preocupaciones y comprensión deben ser convenientemente articulados para conformar planes correctivos que aporten soluciones a las necesidades de los GDI. Cabe destacar la importancia de la Aceptabilidad en la implantación de programas nucleares de potencia, proyectos que requieren una alta concienciación e implicación de las áreas y poblaciones en los que se sitúan.

El Gobierno de Chile, de la mano de la CCHEN, ha realizado en los últimos años diversos estudios para evaluar la percepción y preocupación de los GDI con el objeto de elaborar estudios de comunicación a medida. Adicionalmente, los trabajos que se llevan a cabo en la CCHEN no están exentos de la aplicación de los requisitos legales de transparencia [26]. El análisis de la



---

Condiciones necesarias para la implementación segura de un programa nuclear de potencia en Chile.  
INFORME FINAL

situación chilena requiere la formalización de programas de formación, información y comunicación que ayuden a la comprensión de los riesgos y beneficios de la generación nucleoelectrica en el territorio nacional. Estas acciones deberían considerar adicionalmente una concienciación sobre las actividades que la CCHEN realiza actualmente, y su aportación beneficiosa para la población. El objeto es presentar de una manera adecuada toda la información en torno a las capacidades y posibilidades que se plantean para el futuro de Chile, pero sin descuidar las implicaciones y compromisos que se conllevan, de forma que todas las opiniones formadas participen del proceso de toma de decisión que el país debería llevar a cabo en un futuro próximo.

En otro orden de necesidades, las etapas iniciales del levantamiento de infraestructura de seguridad requieren inversiones significativas en estudios preliminares. Algunos de los más remarcables son los relativos a la **Financiación**. El objeto de estos estudios es, además del de establecer provisiones suficientes, el de dimensionar los órdenes de magnitud de las tareas, de recursos humanos, de su formación y de aquellos costes asociados a garantizar los mínimos de seguridad. El OIEA resalta la importancia de anticipar estos estudios para resaltar de forma temprana posibles carencias que, de darse durante la implementación de los PNP, podrían inducir a posibles deficiencias en la seguridad. Dada la posición actual de Chile es conveniente la realización de estudios de costes de personal, de creación de la base e infraestructura legislativa/reguladora, así como todo lo relacionado con los costes propios del diseño y construcción de una planta nuclear. Estos estudios deben formar la base para definir las estrategias y modelos de financiación que serán utilizadas en las consecutivas fases, ya sean llevadas a cabo por el Estado, el sector privado o un mix de ambas.

Entre las particularidades que presenta la generación nucleoelectrica frente a otras fuentes se encuentra la generación de residuos radiactivos durante el proceso productivo. La aceptación de esta condición implica un compromiso a largo plazo que, de embarcarse Chile en él, conlleva considerar todo el periodo abarcado desde el instante de la toma de decisión hasta el almacenamiento y reposición final del combustible gastado. La discretización de las alternativas de ciclo de combustible a las que Chile puede optar en el caso de implantar un programa nuclear de potencia permite que se puedan contemplar todos los costes asociados y garantizar que se pueda adaptar a las necesidades del país, siempre considerando los más altos estándares de seguridad en el desmantelamiento de plantas nucleares, gestión, almacenamiento, tratamiento y reposición de residuos radiactivos de baja, media y alta actividad. En este aspecto, la experiencia de Chile en la gestión del combustible de los reactores RECH deberá ser considerada como punto de partida para dichos estudios.

Condiciones necesarias para la implementación segura de un programa nuclear de potencia en Chile.  
INFORME FINAL

Todas las fórmulas que debe explorar Chile en el proceso de cierre de las acciones pendientes deben contar con la posición de las **Organizaciones y contratistas de soporte**. Generalmente, la industria nuclear tiende a la participación de organizaciones consolidadas en el sector, principalmente para la instalación de las primeras plantas nucleares del país. De forma orgánica, los estados realizan un proceso de internalización de las capacidades, conforme el crecimiento tecnológico y la transferencia de conocimiento permean en el territorio.

En el caso chileno, existen diversos procesos en que entidades nacionales se encuentran bien posicionadas para futuras adaptarse e incorporaciones a la industria nuclear de potencia. La experiencia en producción y gestión de combustible (aunque distinto tipo al utilizado en las plantas de generación nucleoelectrónica), así como aquellas actividades que llevan a cabo las diversas áreas de la CCHEN, suponen un valor añadido para la promoción de industria nacional o la potencial creación de empresas a incorporar a la matriz. Chile dispone de experiencia en el desarrollo de obras de gran envergadura, por lo que debe iniciar acciones para mejorar el posicionamiento de su industria (y principalmente en el sector Civil) de cara a licitaciones en un mercado abierto que hagan aumentar sus posibilidades de participación. Por este motivo, es necesario que las estrategias actuales se complementen con programas de fomento con vistas al sector nuclear.

La posición de la CCHEN en la proyección a futuro también debe ser determinada, bien si se quiere que desempeñe el papel de organización de soporte técnico u otro rol específico.

El sector nuclear plantea retos específicos de **Liderazgo y gestión** que, si bien los comparte con otros sectores punteros, adquieren otros matices cuando se trata de radiactividad y seguridad para la población. El OIEA hace especial hincapié en cómo se transmiten los valores de seguridad en las personas y entidades que participan en los programas nucleares. La Cultura de Seguridad Nuclear se entiende como el conjunto de características y actitudes en organizaciones e individuos que aseguren que, como prioridad esencial, las cuestiones de seguridad de las centrales nucleares reciban la atención que merecen en razón de su significación. Así pues, una cultura de seguridad positiva debe transmitirse, partiendo desde la Alta Dirección hacia el resto de estratos, a lo largo de toda la cadena de liderazgo. En este sentido, la creación de un proyecto nuclear requiere la creación o adaptación de Sistemas de Gestión a los estándares nucleares requeridos, y para ello, la CCHEN y las organizaciones que participen deben establecer procesos de concienciación en materia de Cultura de Seguridad como eje vertebrador de los mismos.

Un apartado específico lo conforma la selección y desarrollo de **Recursos humanos**, y en la fase preliminar en la que se encuentra Chile, la relativa a la Alta Dirección de las organizaciones

---

Condiciones necesarias para la implementación segura de un programa nuclear de potencia en Chile.  
INFORME FINAL

existentes o de aquellas que se creen. La CCHEN, y en particular el Organismo Regulador Nuclear que se conforme, deben prestar atención a la selección de dichos perfiles de manera que transmitan de forma transversal el concepto primordial de seguridad así como las más altas capacitaciones en la materia.

Se debe realizar el dimensionamiento de los recursos humanos que serán necesarios durante todo el proceso y discretizando entre los distintos actores, principalmente el organismo regulador y el organismo operador, y las competencias que son y serán necesarias para su personal. Este estudio deberá ser complementado con estrategias de capacitación, atracción y retención de talento. La Formación debe conformar un pilar fundamental de la metodología determinada y para ello debe partir de un plan estratégico que tenga en cuenta las proyecciones de los centros educativos (universidades, centros de formación profesional, etc.) del país. Asimismo, se deberá llevar a cabo la evaluación de la necesidad de dedicar inversiones específicas a la creación de espacios de formación específica en caso de no cubrirse las necesidades, para lo que puede ser necesario el establecimiento de convenios internacionales de formación de profesionales. El desarrollo de los recursos humanos se considera un hito significativo dentro del proceso chileno en vías de una potencial implantación de un programa nuclear de potencia.

La **Investigación** debe ser considerada un ítem relevante durante todo el proyecto de nuclearización del país. En este sentido, Chile se encuentra bien posicionada tanto en el campo de la fisión nuclear como en el de la fusión. Los proyectos de investigación se llevan a cabo principalmente por la CCHEN y universidades, y debe plantearse como el punto de partida de generación de aquellos flujos de investigación que deben proveer de conocimiento para propósitos regulatorios y de seguridad. El beneficio directo que buscan estas actividades revierte principalmente sobre el organismo regulador y las empresas de soporte técnico del país, por lo que es importante que existan estrategias de fomento y financiación para cubrir con las necesidades que puedan surgir en materia de seguridad.

Es conveniente identificar aquellas áreas de investigación que deben potenciarse, teniendo en cuenta que las necesidades pueden ser distintas a lo largo del proyecto. Un proceso transversal y a su vez necesario para las actividades que hoy en día se realizan en Chile es la **Protección Radiológica**. Chile dispone de legislación al respecto de la protección radiológica, así como diversos programas de mejora en sus procesos de la mano del OIEA. En los estudios realizados se ha identificado la necesidad de adaptar la regulación de protección radiológica a las condiciones necesarias que supone la implantación de una planta de generación nucleoelectrónica, entre las cuales debe considerarse asuntos como la protección radiológica operacional que puede diferir de aquella considerada en los reactores experimentales. Adicionalmente, el

---

Condiciones necesarias para la implementación segura de un programa nuclear de potencia en Chile.  
INFORME FINAL

transporte de material radiactivo y combustible gastado en programas nucleares de potencia puede generar la necesidad de incluir modificaciones en la legislación y regulación.

Como punto destacado específico, el estadio en el que Chile se encuentra requiere de la realización de evaluaciones enfocadas a caracterizar la generación nucleoelectrónica. En particular, se ha identificado la necesidad de realización de estudios de impacto radiológico asociados a la construcción, operación y, en general, a todo el ciclo de vida del combustible nuclear. Es importante tener en cuenta que dichos estudios deben tener en cuenta la componente local y ambiental, lo que lo convierte en un complemento de los estudios de impacto ambiental que Chile debe realizar en caso de querer optar a un proyecto de generación nuclear.

La concienciación es uno de los puntos clave en la fase en la que se encuentra Chile. En las etapas iniciales, el peso de dicha responsabilidad cae sobre el Gobierno que, según las directrices internacionales, quien debe liderar desde el lado de la seguridad el desarrollo de infraestructura tecnológica y la capacitación de todos los profesionales que participan. Es necesaria la familiarización con las normas de seguridad del OIEA y con las prácticas de otros Estados, según proceda, para adquirir conocimiento de los recursos necesarios para adquirir capacidades de **evaluación de la seguridad** nuclear y operacional. Chile es miembro de la OIEA desde el año 1960, lo cual le ha permitido alinearse con los estándares internacionales. Principalmente de la mano de la CCHEN, ha existido desde entonces colaboración en proyectos y tratados enfocados a la mejora de la seguridad, formación y crecimiento de capacidades. En este proceso, el Gobierno de la República como actor principal de esta fase, debe participar activamente del desarrollo y comprensión de cómo se aplican y desarrollan las Evaluaciones de Seguridad en la industria nuclear.

El carácter largo-placista de un proyecto nuclear implica una dedicación significativa de esfuerzos hacia la previsión de estrategias, con especial interés en la **Seguridad de la gestión de residuos radiactivos, combustible gastado y desmantelamiento**. Deben iniciarse las actividades para la identificación de las diversas estrategias de ciclo de combustible de que se dispone. Chile posee experiencia en el manejo de residuos de baja y media actividad, por lo que es un referente en la región de América Latina y el Caribe. Asimismo, debido a la operación de sus reactores experimentales, también posee experiencia en el manejo y transporte de combustible gastado. Se han desarrollado proyectos diversos de cooperación técnica y estudios en esta materia. Asimismo, en la Planta de Tratamiento de Desechos Radiactivos ubicada en CEN Lo Aguirre, se realiza tratamiento y acondicionamiento en matrices cementíceas a desechos radiactivos generados en Chile, provenientes de Industrias, Hospitales y Centros de Investigación del país, así como de la propia CCHEN.

Condiciones necesarias para la implementación segura de un programa nuclear de potencia en Chile.  
INFORME FINAL

Antes de tomar una decisión sobre el lanzamiento de un programa de energía nuclear, debería considerarse la disponibilidad de opciones alternativas para la gestión de desechos radiactivos de alta actividad, incluida su disposición final. Debe tenerse en cuenta la posibilidad de garantizar la seguridad a largo plazo mediante opciones alternativas y la incertidumbre de las estimaciones de costes en cada opción. En el estadio preliminar chileno debe reconocerse que la dependencia de servicios en otros Estados para la gestión del combustible gastado, tal como se incluye en algunas opciones, aumentaría la incertidumbre del cálculo de los costos.

Como ya se ha comentado en capítulos anteriores, el riesgo sísmico inherente a Chile es uno de los principales retos con los que se enfrenta la implementación de un programa nuclear de potencia, y cuyo estudio y previsión son cruciales. El impacto de una mala prevención y gestión de accidentes, independientemente del origen que tengan, revierte en una extensiva afectación a la población, por lo que es mandatoria la **Preparación y respuesta ante emergencias**. El Gobierno debe tomar conciencia de la necesidad de establecer tempranamente planes de emergencia radiológica, así como incorporar aquellas modificaciones necesarias a sus planes de protección civil. Durante la Fase 1, debe reconocerse la necesidad de un acuerdo sobre la asignación de responsabilidades en el desarrollo de arreglos para la preparación y respuesta ante emergencias. Un examen detallado de las opciones de planificación de emergencia y los costos también deben considerarse en esta etapa.

La ONEMI (Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior y Seguridad Pública), el organismo técnico del Estado de Chile encargado de la coordinación del Sistema Nacional de Protección Civil, tiene como misión planificar, impulsar, articular y ejecutar acciones de prevención, respuesta y rehabilitación frente a situaciones de riesgo colectivo, emergencias, desastres y catástrofes de origen natural o provocado por la acción humana. En la actualidad no existe un plan nacional de emergencias radiológicas, y deben establecerse acciones para su formalización, así como la de aquellos procedimientos y protocolos particulares de ejecución que sean necesarios. Es importante la planificación de recursos humanos, medios técnicos y económicos para garantizar el más alto nivel de seguridad en materia de preparación y respuesta ante emergencias. Las entidades que participarán en el Plan de emergencias radiológicas deberán ser identificadas como así sus roles, y deberán ser adecuadamente coordinadas. A tal efecto, en los últimos años Chile desarrolla planes de capacitación de los profesionales y entidades chilenas haciendo uso de los vínculos con organizaciones internacionales expertas como el OIEA y el DOE de los Estados Unidos.

Otro de los actores importantes en el proceso desarrollado por el OIEA para la implantación de la infraestructura de seguridad es la **Organización operadora de la planta**. Chile no se

---

Condiciones necesarias para la implementación segura de un programa nuclear de potencia en Chile.  
INFORME FINAL

encuentra actualmente en el estadio de selección de un organismo operador, si bien sí se han hecho prospecciones de las posibles combinaciones y alternativas de propiedad y de dueño / operador, explorando las posibilidades de participación del Gobierno y el sector privado. Sin embargo, y como parte de las actividades enfocadas a la previsión de costes y necesidades ligadas con la seguridad, es necesario que el gobierno defina la estructura, responsabilidades y funciones que desempeñará el organismo operador, así como estimar los recursos humanos y financieros que supondrán. Se considera importante la definición prospectiva de las capacitaciones necesarias para el equipo humano que estructurará dicha organización.

Según los estándares internacionales, es el organismo operador el encargado de la realización de los estudios de emplazamiento necesarios para el licenciamiento del proyecto. Sin embargo, y debido al carácter intensivo de recogida de datos que conlleva, se identifica la necesidad de que Chile comience con la recogida de información. El gobierno de Chile ha decidido postergar la **Selección y evaluación de emplazamientos** hasta una etapa posterior a la toma de decisión. Los trabajos relacionados con ello, por otra parte, no pueden ser descuidados en la fase actual. Es necesario que se definan y formalicen los criterios que el organismo regulador utilizará durante las siguientes etapas para la evaluación de los emplazamientos candidatos, de cara a poder compararlos y seleccionar aquellos que otorguen suficientes garantías desde el punto de vista de la seguridad.

En paralelo, debe realizarse una recogida de datos intensiva, y el posterior estudio de los mismos, para establecer una pre-identificación de potenciales emplazamientos, basándose en una metodología de exclusión de aquellos emplazamientos que no cumplan los requisitos de seguridad. Los emplazamientos candidatos resultantes de esta etapa participarán del proceso de selección posteriormente. Pese a que los estudios de evaluación de impacto ambiental definitivos deberán ser realizados por el titular, es necesario realizar unos estudios de impacto ambiental preliminares (incluyendo el impacto radiológico) para acompañar el proceso de selección de emplazamientos.

Adicionalmente al emplazamiento, no debe descuidarse el propio **Diseño** de la planta. Debe asegurarse se conocen los objetivos de la seguridad nuclear y cómo se tienen en cuenta en las centrales nucleares de diversos diseños por parte del gobierno. Complementariamente a la formación en la materia, debe desarrollarse un estudio de detalle de las distintas aproximaciones y diseños tecnológicos existentes en el mercado para evaluar sus sistemas de seguridad y cómo sus diseños particulares responden a las funciones de seguridad, de cara a la toma de decisión informada acerca de lanzar un programa nuclear de potencia.

Condiciones necesarias para la implementación segura de un programa nuclear de potencia en Chile.  
INFORME FINAL

Un hecho a tener en cuenta responde a los cambios que están acaeciendo en el sistema de distribución eléctrica chileno. Está prevista (finales 2017 – principios de 2018) la interconexión de los dos sistemas eléctricos principales, el SIC y el SING. Es conveniente que el Gobierno de la República evalúe los principales parámetros de seguridad de la red eléctrica e infraestructuras tecnológicas con el fin de analizar la afectación que pueden tener sobre una planta de generación núcleo-eléctrica. Tras el análisis de capacidades, fiabilidad y estabilidad, deberán establecerse acciones para mejorar dichos parámetros en caso necesario.

Por último, el OIEA y otros organismos internacionales resaltan la importancia de que los gobiernos en vías de implantar la generación nucleoelectrica en su mix energético fomenten la cultura de seguridad nuclear y cultura de seguridad física, teniendo en cuenta sus puntos en común y diferencias.

Chile ha tomado conciencia sobre la importancia de la seguridad física y nuclear, tanto en el territorio nacional como más allá de sus fronteras. Muestra de ello son los compromisos multilaterales a los que se ha adherido, así como los distintos proyectos de cooperación para la mejora de la gestión, control e incremento de la seguridad en el material y actividades nucleares y radiológicas. Sin embargo, es necesario potenciar las referencias a Cultura de Seguridad y su relación con la Seguridad Física en todos los planos y estamentos. Es necesario realizar una labor de concienciación a todos los ámbitos de la CCHEN, el Gobierno y otros participantes con el fin de asegurar que todos los procesos se llevan a cabo bajo los conceptos de una cultura de seguridad activa y efectiva.

### **8.3. Conclusiones del estudio**

En el contexto de seguridad en el que se mueven los lineamientos del OIEA, el presente estudio ha identificado las siguientes áreas que requieren especial desarrollo para continuar con el establecimiento de una estructura fundamentada en la seguridad, independientemente de la decisión final tomada:

- El desarrollo y capacitación de los recursos humanos es de vital importancia en el establecimiento de un contexto de seguridad, ya sea para el desarrollo de un programa de núcleo-electricidad o para la continuación de las actividades actuales de Chile. En este contexto y etapa en la que Chile se encuentra, es necesario notar que el proceso debe partir de un compromiso en el alto nivel gubernamental. El número de personas participantes en las fases iniciales del proceso de lanzamiento de un PNP es reducido, por lo que debe promoverse que dichos perfiles tengan un elevado conocimiento y

---

Condiciones necesarias para la implementación segura de un programa nuclear de potencia en Chile.  
INFORME FINAL

compromiso con la seguridad que puedan transmitir a aquellas personas y organizaciones que gradualmente vayan incorporándose al proyecto. En este sentido, en el presente informe se resalta la importancia de que el gobierno de Chile establezca, garantice y mantenga los recursos humanos y económicos necesarios para el Grupo encargado del desarrollo del PNP.

- También en materia de recursos humanos, Chile se encuentra en el estadio de profundizar en los requerimientos que tendrán las actividades y organizaciones encargadas de desarrollar y mantener un potencial PNP. Es por ello que en el presente estudio remarca la necesidad de dimensionar el personal e identificar las cualificaciones y capacitaciones necesarias de forma prospectiva. Con el fin de no comprometer los criterios de seguridad en ninguna etapa del proceso, se debe garantizar que cada organización y grupo participante en el proceso disponga de personal y financiamiento suficiente para que la seguridad nunca se encuentre en cuestión frente a otras condiciones de contorno. Adicionalmente, el presente informe resalta la importancia de la formación y capacitación, en la cual la CCHEN ya se encuentra trabajando activamente, como principal vector transmisor de la Cultura de Seguridad.
- La elevada importancia de la aceptabilidad social en el proceso de toma de decisión sitúa el compromiso con la opinión pública y los grupos de interés entre las principales áreas de desarrollo dada la fase en la que se encuentra Chile. Los estudios de opinión realizados hasta la fecha han arrojado las claves sobre las que debe fundamentarse un programa de comunicación orientado a la transmisión objetiva de los riesgos y beneficios de la producción núcleo-eléctrica. Adicionalmente a estos temas, el presente estudio hace hincapié en la necesidad de dar a conocer cómo la CCHEN, mediante las actividades que realiza y los criterios de seguridad que pone en práctica, está contribuyendo al desarrollo tecnológico y social de Chile.
- Como hito relevante, se hace especial hincapié en la formalización un organismo regulador independiente. Principalmente en las fases iniciales, el organismo regulador supone una pieza clave en el establecimiento de los pilares de seguridad del programa nuclear. La falta de independencia del organismo con respecto al gobierno u otros estamentos, o a actividades (como la promoción) pueden poner en cuestión los criterios de seguridad que se aplican en la regulación y fiscalización aplicada por este organismo. Durante la realización del presente informe se ha comprobado que Chile ha identificado este paso como mandatorio y está trabajando en ello.



---

Condiciones necesarias para la implementación segura de un programa nuclear de potencia en Chile.  
INFORME FINAL

- Como procedimiento paralelo, se hace hincapié en el establecimiento de organización(es) de soporte técnico para apoyar las labores del regulador y otros organismos.
- La cooperación internacional ha sido un área especialmente trabajada por Chile, y en especial por la CCHEN. Mediante el intercambio de conocimiento con expertos se ha continuado con la capacitación en materia de planificación y respuesta ante emergencias. Tras este proceso, se considera a Chile en posición de proceder a la formalización de los planes de emergencia radiológica para integrarlos dentro del Plan Nacional de Protección Civil.

Si bien la selección de emplazamientos ha sido postergada, en el caso de Chile, a un estadio posterior a la toma de decisión acerca del lanzamiento de un potencial programa nuclear de potencia, es necesario que el país inicie el establecimiento de criterios con los que se evaluarán. Adicionalmente, la recogida de datos para la toma de decisión es un proceso intensivo y con un marco temporal considerable, por lo que en el presente informe se resalta la necesidad de iniciar la recogida de datos y la realización de prospecciones acerca de potenciales áreas para el emplazamiento de una planta nuclear de potencia. En caso de que los registros y estudios nacionales dispongan de suficientes datos sobre geología, meteorología, sismicidad, volcanología y demografía, el proceso de análisis de los mismos para iniciar la evaluación de emplazamientos podría abarcar entre 1 y 3 años, lo cual es óptimo para la fase actual de Chile, pero debe tenerse en cuenta que, en caso de requerirse la obtención de datos por medio de estudios específicos (por ejemplo, ensayos de laboratorio o monitoreos particulares), dicho periodo podría extenderse entre los 5 y 10 años.

Condiciones necesarias para la implementación segura de un programa nuclear de potencia en Chile.  
INFORME FINAL

## 9. CONCLUSIONES GENERALES

Del análisis del estado del arte de la industria nuclear se concluye que la industria nuclear es una industria madura que es capaz de aprender de las deficiencias y malfuncionamientos, de forma que las causas que han originado estas deficiencias y que han llevado a los incidentes o accidentes, sean identificadas y se tomen medidas correctoras para prevenir su recurrencia futura, tanto en la propia instalación como en el resto de instalaciones en las que potencialmente podría ocurrir, a través de mecanismos de realimentación sólidos que permiten compartir la información de forma fluida y clara, y que incluyen tanto a la propia industria a través de los operadores, como a los cuerpos reguladores que se encargan de la vigilancia y supervisión de las instalaciones nucleares.

Prueba de ello son las nuevas tecnologías de reactores (de las cuales se han seleccionado algunas de ellas para analizar sus características más importantes, i.e. APR1400, VVER-1200, ABWR), y que demuestran en sus diseños haber incorporado las lecciones aprendidas a lo largo de la evolución de la industria nuclear, con los diferentes eventos que ésta industria ha tenido (tanto incidentes como accidentes) y las distintas medidas que han ido implantándose con el objetivo de incrementar la seguridad nuclear.

Respecto a la sismicidad y su afectación potencial a las centrales nucleares, puede extraerse que no ha habido ningún sismo registrado de cierta magnitud (ni de altas intensidades), ni cuando las aceleraciones que éste ha provocado han sido mayores que las aceleraciones previstas en el diseño, el cual haya comprometido o afectado la seguridad de las centrales nucleares, en ninguna de las barreras físicas establecidas en la defensa en profundidad, ni en ninguna de las funciones fundamentales de seguridad, habiéndose mantenido siempre íntegras las barreras, y realizadas correctamente las funciones de seguridad.

Ello da fe de que, aún incluso en zonas altamente sísmicas como puede ser Chile, el diseño, la construcción y la operación segura de centrales nucleares es plenamente posible, teniendo en cuenta los criterios tecnológicos adecuados a este factor, como por ejemplo contar con la información de fallas sismológicas y estudios de mecánica de suelos en el emplazamiento, así como una selección adecuada del emplazamiento. Además Chile es un País con experiencia respecto al diseño sísmico, y cuenta con normativa específica para ello.

Atendiéndose a la recomendación de la guía de seguridad específica del OIEA, SSG-9 [20], será conveniente en Chile realizar el análisis de vulnerabilidad frente a sismos, a través de un proyecto específico, para el cual se disponga de unos objetivos claros y detallados, y éste debe llevar asociado un plan de trabajo. Este proyecto se debería llevar a cabo a través de un equipo

Condiciones necesarias para la implementación segura de un programa nuclear de potencia en Chile.  
INFORME FINAL

multidisciplinar formado por expertos en varios campos, como la geología, la sismología, la geofísica, la ingeniería y posiblemente otras áreas (como la historia).

En relación al estudio de brechas nacionales en infraestructura de seguridad para la implantación de un programa nuclear de potencia, ha podido contrastarse que el estadio de avance de Chile sobre la Fase 1 de los lineamientos establecidos por el OIEA es significativo. Las actividades que actualmente la CCHEN realiza en materia de investigación y desarrollo, protección radiológica y formación, suponen una base sólida a partir de la cual el país está construyendo las infraestructuras de seguridad necesarias para situarse en la mejor de las posiciones para la toma de decisión. La operación de sus reactores experimentales, el desarrollo de base legislativa y, de forma especial, la involucración del país en la cooperación internacional mediante la formación cruzada y el establecimiento de convenios multilaterales se presentan como puntos fuertes en el proceso.

Como hitos de mejora para el desarrollo posterior y avance, se han identificado:

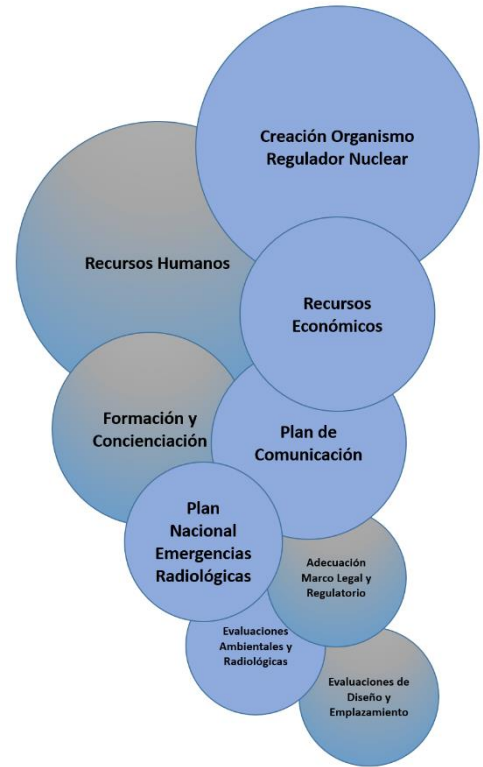
- El desarrollo y capacitación de los recursos humanos y compromiso con la seguridad. Asimismo, Chile deberá considerar los requerimientos que tendrán las actividades y organizaciones encargadas de desarrollar y mantener un potencial PNP.
- La importancia de que el gobierno de Chile establezca, garantice y mantenga los recursos humanos y económicos necesarios para el Grupo encargado del desarrollo del PNP.
- Fortalecimiento y formación en Cultura de Seguridad.
- Comunicación y aceptabilidad pública.
- Creación y desarrollo de un Organismo regulador que cumpla con una independencia efectiva a todos los niveles.
- Establecimiento de organizaciones de soporte técnico.
- Formalización de Plan de Emergencias Radiológicas.

Condiciones necesarias para la implementación segura de un programa nuclear de potencia en Chile.  
**INFORME FINAL**

REQUISITO	ACCIONES
1 - Política y estrategia nacional en pos de la seguridad	Requiere acciones
2 - Régimen de seguridad nuclear global	Requiere acciones
3 - Marco legal	Requiere acciones
4 - Marco regulatorio	Requiere acciones
5 - Transparencia	Requiere acciones
6 - Financiación	Requiere acciones
7 - Organizaciones y contratistas externos de soporte	Requiere acciones
8 - Liderazgo y gestión para la seguridad	Requiere acciones
9 - Desarrollo de recursos humanos	Requiere acciones
10 - Investigación para propósitos regulatorios y de seguridad	Requiere acciones
11 - Protección radiológica	Requiere acciones
12 - Evaluación de seguridad	Requiere acciones
13 - Seguridad en gestión de residuos radiactivos, combustible gastado y desmantelamiento	Requiere acciones
14 - Preparación y respuesta ante emergencias	Requiere acciones
15 - Organización operadora de la planta	Requiere acciones
16 - Selección y evaluación de emplazamientos	Requiere acciones
17 - Seguridad del diseño	Requiere acciones
18 - Preparación para la puesta en marcha	No requiere acciones
19 - Seguridad en el transporte	No requiere acciones
20 - Interfases con la seguridad física	Requiere acciones

Leyenda:

Alta importancia - Corto plazo
Alta importancia - Medio plazo
Baja importancia - Largo plazo
Sin acciones



Leyenda:

Gobierno
Regulador

**Ilustración 5: Acciones resultantes.**

Condiciones necesarias para la implementación segura de un programa nuclear de potencia en Chile.  
INFORME FINAL

## 10. REFERENCIAS

- [1] International Atomic Energy Agency (IAEA), *SSG-16 - Establishing the Safety Infrastructure for a Nuclear Power Programme*, (2012).
- [2] Ministerio de Energía. Gobierno de Chile, *"Energía 2050. Política energética de Chile"*, (2015).
- [3] OIEA, *SF-1. Safety Fundamentals. Fundamentals Safety Principles*, 2006.
- [4] OIEA, *INSAG-10 "Defense in Depth in Nuclear Safety"*, OIEA, 1996.
- [5] OIEA, *INSAG-27. Ensuring Robust National Nuclear Safety Systems - Institutional Strength in Depth*, 2017.
- [6] OIEA, *75-INSAG-4. Safety Culture*, 1991.
- [7] OIEA, *Safety Requirements No. GSR-Part 2. Leadership and Management for Safety*, 2016.
- [8] CSN, IS-19. Instrucción IS-19, sobre los requisitos del sistema de gestión de las instalaciones nucleares, 2008.
- [9] OIEA, *General Safety Requirements No. GSR Part 2. Leadership and Management for Safety*, 2016.
- [10] OIEA, *INSAG-12. Basic Safety Principles for Nuclear Power Plants 75-INSAG-3 Rev. 1.*, 1999.

---

Condiciones necesarias para la implementación segura de un programa nuclear de potencia en Chile.  
INFORME FINAL

- [11] IDOM, *IIT-001 "Estudio sobre el Estado del Arte de la Industria Nuclear en términos de Seguridad"*, (2017).
- [12] P. J.G. Marques. Instituto Tecnológico e Nuclear & Centro de Física Nuclear da Universidade de Lisboa, *REVIEW OF GENERATION-III/III+ FISSION REACTORS*, Nuclear Energy Encyclopedia: Science, Technology, and Applications, First Edition, 2011.
- [13] American Academy of Arts & Sciences, *Stephen M. Goldberg and Robert Rosner. Nuclear Reactors: Generation to Generation*, 2011.
- [14] Westinghouse, *AP1000: Passive Safety Systems and timeline for Station Blackout*, 2011.
- [15] OIEA, *Status report 83 - Advanced Power Reactor 1400 MWe (APR1400)*.
- [16] OIEA, *Status report 108 - VVER-1200 (V-491) (VVER-1200 (V-491))*.
- [17] ROSATOM, *The VVER today: Evolution, Design, Safety*.
- [18] Corporación Nuclear Eléctrica Chile S.A., *Análisis Relativo de Impacto y Riesgos de la Generación Núcleo-Eléctrica. Documento Final*, Santiago de Chile, Junio de 2009.
- [19] WNA, «Nuclear Power Plants and Earthquakes,» [En línea]. [Último acceso: 22 Septiembre 2017].
- [20] OIEA, *SPECIFIC SAFETY GUIDE SSG-9. Seismic Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installations*, 2010.
- [21] OIEA, *Safety Guide NS-G-1.6. Seismic Design and Qualification for Nuclear Power Plants*, 2003.

---

Condiciones necesarias para la implementación segura de un programa nuclear de potencia en Chile.  
INFORME FINAL

[22] Tohoku Electric Power Co., Inc., Japan, *SIMULATION ANALYSIS OF EARTHQUAKE RESPONSE OF THE ONAGAWA NUCLEAR POWER PLANT TO THE 2003 MIYAGI-OKI EARTHQUAKE.*

[23] Varios, *Generación Núcleo-Eléctrica en Chile: Hacia una Decisión Racional*, Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN), 2015.

[24] IDOM, *IIT-002 "Estudio para identificar las brechas nacionales y propuesta de acciones en materia de seguridad (OE2)", (2017).*

[25] Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, *"LEY Nº18302. LEY DE SEGURIDAD NUCLEAR", (1984).*

[26] Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, *"LEY Nº20285. SOBRE ACCESO A LA INFORMACIÓN PÚBLICA", (2008).*