

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN)

Mayo 2018

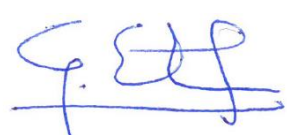
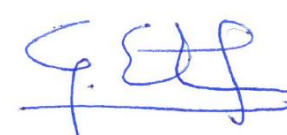
21399 / IIT-002 v. 0B

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 © 2018, IDOM CONSULTING, ENGINEERING, ARCHITECTURE, S.A.U



**Estudio para la identificación y evaluación de posibles
 efectos e impactos ambientales producidos por la
 generación de energía nuclear de potencia en Chile.
 Informe N° 1.**

Redactado:	Revisado:	Aprobado:
<i>Firma</i>  <u>Belén Martínez</u>	<i>Firma</i> 	<i>Firma</i> 
<i>Nombre</i> Sara del Hoyo (SHG) / Belén Martínez (BMC)	<i>Nombre</i> Gabriel Esteban (GEL)	<i>Nombre</i> Gabriel Esteban (GEL)
<i>Fecha</i> 23/05/2018	<i>Date</i> 24/05/2018	<i>Date</i> 25/05/2018

Área	Encargo	Informe	Versión	CD
NS - MA	21399	IIT-002	0B	07.03

En blanco intencionadamente

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

TABLA DE VERSIONES

<i>Versión</i>	<i>Fecha</i>	<i>Objeto de la versión</i>
0A	Abril 2018	Edición inicial
0B	Mayo 2018	Incluidos comentarios de CCHEN según acta comentarios.

MODIFICACIONES RESPECTO A LA VERSIÓN ANTERIOR

--

LISTA DE PENDIENTES

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

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

En blanco intencionadamente

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

ÍNDICE DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
2.	OBJETIVOS Y ALCANCE	3
3.	DESCRIPCIÓN DE LAS PLANTAS DE GENERACIÓN NUCLEOELÉCTRICA E IDENTIFICACIÓN DE SUS IMPACTOS.....	4
3.1.	Fases de la vida de una central nuclear: construcción, operación y desmantelamiento.....	5
3.1.1.	Construcción.....	6
3.1.2.	Operación	7
3.1.3.	Desmantelamiento.....	11
3.2.	Descripción de tecnologías de generación nuclear	14
3.2.1.	Reactores de Agua Ligera o <i>Light Water Reactor</i> (LWR)	14
3.2.2.	Reactores Modulares o <i>Small Modular Reactor</i> (SMR)	17
3.2.3.	Reactores de Agua Pesada o <i>Heavy Water Reactor</i> (HWR).....	19
3.3.	Ciclo de combustible nuclear	23
3.3.1.	Minería y fabricación de concentrados.....	24
3.3.2.	Conversión.....	28
3.3.3.	Enriquecimiento	29
3.3.4.	Fabricación del combustible	32
3.3.5.	Operación de la planta: quemado, recarga y almacenamiento en piscina ..	33
3.3.6.	Almacenamiento del combustible nuclear: Ciclo Abierto	37
3.3.7.	Reprocesado del combustible nuclear: Ciclo Cerrado	38
3.4.	Tabla resumen de las entradas y salidas de cada proceso	40
4.	ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA.....	41
4.1.	Metodología de Análisis de Ciclo de Vida	41
4.2.	Recopilación del inventario	52
4.2.1.	LWR (PWR)	54
4.2.2.	SMR.....	57
4.2.3.	HWR	59
4.3.	Evaluación de impactos	62
5.	CONCLUSIONES.....	67
6.	REFERENCIAS	72
I.	ANEXO I – Categorías de impacto midpoint sin normalizar para cada tecnología y para cada etapa del ciclo del combustible	
II.	ANEXO II – Inventario SIMAPRO®	
III.	ANEXO III – Datos por unidad funcional	

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Entradas y salidas en la fase de construcción de la planta.	7
Tabla 2. Ejemplo del isotópico de efluentes gaseosos para una central tipo PWR.....	9
Tabla 3. Ejemplo del isotópico de efluentes líquidos para una central tipo PWR.....	9
Tabla 4. Entradas y salidas en la fase de operación de la planta.....	11
Tabla 5. Entradas y salidas en la fase de desmantelamiento.....	13
Tabla 6. Entradas y salidas en la fase de producción de agua pesada.....	22
Tabla 7. Entradas y salidas en la fase de construcción de la planta de agua pesada.	23
Tabla 8. Entradas y salidas en la fase de minería y fabricación de concentrados.	27
Tabla 9. Entradas y salidas en la fase de conversión.....	29
Tabla 10. Entradas y salidas en la fase de enriquecimiento.	31
Tabla 11. Entradas y salidas en la fase de fabricación del combustible.....	33
Tabla 12. Entradas y salidas en la fase de operación de la planta.....	37
Tabla 13. Tabla resumen de las entradas y salidas de cada proceso	40
Tabla 14. Selección de software, bases de datos y metodología de cálculo.....	45
Tabla 15. Descripción de categorías de impacto del método ReCiPe®	47

LISTA DE FIGURAS

Figura 3-1. Reactores nucleares en el mundo [3].	4
Figura 3-2. Número de reactores en el mundo según las distintas tecnologías nucleares [3]. ...	14
Figura 3-3. Esquema básico de un reactor PWR [9].....	16
Figura 3-4. Planta prototipo SMR (NuScale) [10].....	18
Figura 3-5. Esquema básico de un reactor SMR.	19
Figura 3-6. Esquema básico de un reactor HWR [12].	20
Figura 3-7. Esquema reducido el ciclo de combustible nuclear.....	24
Figura 3-8. Reservas de uranio en el mundo OCDE [14].	24
Figura 3-9. Producción de <i>yellow cake</i>	26
Figura 3-10. Esquema de enriquecimiento de uranio por centrifugación.	31
Figura 3-11. Elemento combustible de un reactor tipo PWR.....	32
Figura 3-12. Núcleo del reactor.....	33
Figura 3-13. Esquema Ciclo Abierto.	38
Figura 3-14. Esquema Ciclo Cerrado.....	39

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

Figura 4-1. ISO 14040 ACV – fases del análisis.....	42
Figura 4-2. Enfoques de ACV	43
Figura 4-3. Ejemplo de los procesos unitarios que conforman el ACV.....	44
Figura 4-4. Estructura de la metodología ReCiPe®.....	46
Figura 4-5. Pantallazo de la interfaz de SimaPro®, factores de caracterización para la categoría de formación de oxidantes fotoquímicos	49
Figura 4-6. Factores de normalización para las categorías de impacto	50
Figura 4-7. Categorías de daño <i>endpoint</i> según ReCiPe®	51
Figura 4-8. Factores de normalización y ponderación <i>endpoint</i>	52
Figura 4-9. Total nacional de generación eléctrica bruta por tipo de tecnología	53
Figura 4-10. Esquema del ciclo de vida de LWR	54
Figura 4-11. Esquema del ciclo de vida de SMR	57
Figura 4-12. Esquema del ciclo de vida de HWR	61
Figura 4-13. Proceso de obtención de los resultados (metodología ReCiPe®)	62
Figura 4-14. Puntuación única para las tecnologías evaluadas	63
Figura 4-15. Categorías de daño <i>endpoint</i>	64
Figura 4-16. Categorías de impacto <i>midpoint</i>	65
Figura 4-17. Contribuciones de las tres tecnologías a las diferentes categorías de impacto	66

ÍNDICE DE ACRÓNIMOS Y SIGLAS

ACV	Análisis Ciclo de Vida
BWR	<i>Boiling Water Reactor</i>
CA	Ciclo abierto
CANDU	<i>Canadian Deuterium Uranium</i>
CC	Ciclo cerrado
CCHEN	Comisión Chilena de Energía Nuclear
CSN	Consejo de Seguridad Nuclear
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i>
GEI	Gases de Efecto Invernadero
HWR	<i>Heavy Water Reactor</i>
IAEA	<i>International Atomic Energy Agency</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LWR	<i>Light Water Reactor</i>

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

MOX	<i>Mixed Oxide</i>
NEA	<i>Nuclear Energy Agency</i>
OCDE	<i>Organisation for Economic Co-operation and Development</i>
PNP	<i>Plan nuclear de Potencia</i>
PRIS	<i>Power Reactor Information System</i>
PUREX	<i>Plutonium Uranium Redox EXtraction</i>
PWR	<i>Pressurized Water Reactor</i>
SMR	<i>Small Modular Reactor</i>

1. INTRODUCCIÓN

Desde su creación en 1965, la Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN) tiene como misión investigar, desarrollar y controlar las aplicaciones pacíficas de la energía nuclear, generando valor y bien público, y asegurando la protección del medioambiente y la seguridad de las personas. Entre todas las posibles aplicaciones, destaca la de generación de energía eléctrica; la posibilidad de una Plan Nuclear de Potencia (PNP) lleva varios años en discusión y evaluación en Chile.

Así pues, la CCHEN, en su calidad de organismo asesor del estado en materias relacionadas con los usos pacíficos de 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 pueda ser considerada dentro de las opciones a evaluar para la matriz energética nacional.

Dentro de los temas relevantes a ser considerados, se encuentra el poder determinar y evaluar qué impactos ambientales están asociados a la generación de la energía nuclear de potencia y como esta se compara respecto a otras tecnologías de generación eléctrica.

Es necesario el empleo de enfoques multidisciplinarios de diversas áreas de conocimiento para poder llegar a comprender, medir, cuantificar los impactos ambientales que se generan por las actividades humanas y posteriormente traducirlos con la mayor precisión posible a un lenguaje común que permita entender y comparar las distintas variables que se presentan.

Dentro del marco establecido por la Política Energética de Chile desarrollada a través del Programa Participativo Energía 2050 se promueve la aplicación del enfoque del ciclo de vida para incentivar un sector energético compatible con el medio ambiente. Es en este contexto el que toma fuerza el Análisis de Ciclo de Vida (ACV), herramienta de gestión ambiental reconocida internacionalmente – Norma ISO 14040 [1] y Norma ISO 14044 [2]- utilizada para identificar de forma objetiva y rigurosa los impactos medioambientales de un producto, proceso o actividad, desde la extracción de las materias primas necesarias para elaboración hasta su gestión final como residuo. Esta herramienta permite proporcionar información útil a los sectores público y privado implicados en la toma de decisiones relativas a la mejora ambiental. El ACV no solo se centra en una única categoría de impacto ambiental, sino que tiene en cuenta distintas categorías en función de las características del estudio. Esto permite tener una visión más completa del impacto que genera en este caso el proceso de generación eléctrica de origen nuclear.

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

Es por ello que, mediante el ACV, la CCHEN podrá evaluar los impactos asociados a las diferentes tecnologías de generación de energía eléctrica de origen nuclear, pudiendo así presentar una alternativa apta para poder ser incluida en la matriz energética nacional.

Para abordar este proceso, la CCHEN ha contratado a IDOM, mediante la licitación referencia ID: 872-204-LE17 “Identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia”, un servicio de asesoría para la identificación y evaluación que tendría la incorporación de la generación nucleoelectrica en el país.

Este documento surge como el segundo entregable (Informe 1) de los cuatro a ser desarrollados y entregados a satisfacción de la CCHEN a lo largo del proyecto.

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

2. OBJETIVOS Y ALCANCE

El objetivo de este informe es identificar, definir y caracterizar las potenciales emisiones y descargas para la generación eléctrica con origen nuclear. Mediante el ACV, la CCHEN podrá evaluar los impactos asociados a las diferentes tecnologías de generación de energía eléctrica de origen nuclear, pudiendo así presentar una alternativa apta para poder ser incluida en la matriz energética nacional.

Como análisis previo al ACV, en este informe se incluye una descripción a nivel general de las tecnologías de generación nuclear identificadas de posible aplicación en el territorio chileno. Además, se describe el ciclo del combustible nuclear desde la extracción de minera hasta su gestión definitiva. En este paso se busca llevar a cabo una identificación previa de las posibles entradas y salidas de cada etapa que posiblemente conlleven impactos al medio.

Respecto al ACV, se utilizará el enfoque de la *cuna a la puerta* del Análisis de Ciclo de Vida se estudiarán las emisiones y descargas de cada una de las etapas del ciclo de combustible nuclear, desde la minería de uranio (U) hasta el reprocesamiento y/o gestión de combustible nuclear gastado, considerando tres tipos de tecnología: Reactores de Agua Pesada (*Heavy Water Reactor*, HWR), Reactor Agua Ligera (*Light Water Reactor*, LWR) y Reactor Modular (*Small Modular Reactor*, SMR).

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

3. DESCRIPCIÓN DE LAS PLANTAS DE GENERACIÓN NUCLEOELÉCTRICA E IDENTIFICACIÓN DE SUS IMPACTOS

En el presente apartado se desarrollará una descripción general de la generación nuclear a potencia partiendo de la construcción, operación y desmantelamiento de la central nuclear e incluyendo el ciclo de combustible nuclear completo (ciclo abierto y ciclo cerrado). Este análisis descriptivo se llevará a cabo para tres tipos de tecnología nuclear: HWR, LWR y SMR. El objetivo de este capítulo es introducir las características básicas del ciclo completo de generación de energía nucleoelectrica para estos tres tipos de reactores con el fin de identificar y caracterizar las posibles impactos medioambientales en cada una de las fases del ciclo. Todo ello servirá de introducción cualitativa para el apartado 4 en el que se evaluará y cuantificará el impacto de dichos efectos sobre el medioambiente.

En los últimos 60 años, la evolución de la ciencia y la técnica en el ámbito nuclear a escala global han servido de catalizador para el desarrollo de distintas tecnologías de generación nucleoelectrica. Hoy en día, existen 450 reactores nucleares en operación repartidos en 30 países. Además, el sector nuclear mundial cuanta con la previsión de incrementar el número de reactores en 56 más a lo largo de 16 países¹.

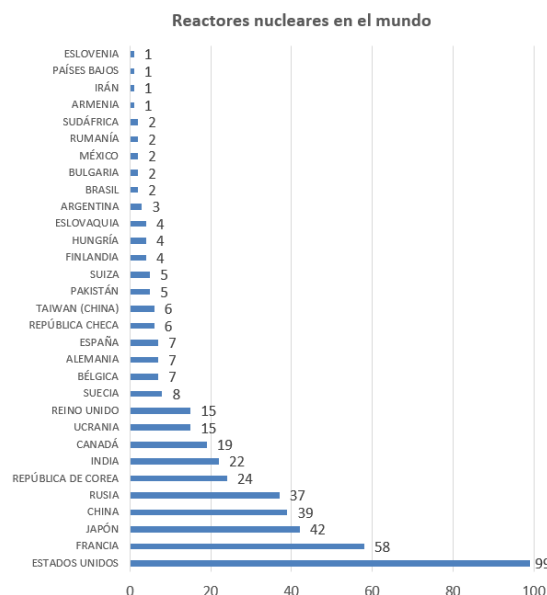


Figura 3-1. Reactores nucleares en el mundo [3].

¹ Datos extraídos de la base de datos PRIS [3] (Power Reactor Information System) de la IAEA con fecha 2018-04-23.

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

Cada uno de estos reactores sigue unas líneas de diseño muy concretas definidas por el tipo de tecnología de generación nuclear. No obstante, el fundamento físico es común a todas ellas: la producción de energía eléctrica basada en reacciones nucleares controladas en cadena.

En el presente estudio se han contemplado tres tipos de tecnología de generación nuclear:

- Reactores de Agua Ligera o *Light Water Reactors* (LWR).
- Reactores de Agua Pesada o *Heavy Water Reactors* (HWR).
- Reactores Modulares o *Small Modular Reactors* (SMR).

La selección de estos tres tipos de reactores se considera suficientemente representativa para presente estudio. El análisis de las tres tecnologías abarca el estatus actual del sector nucleoelectrico y, al mismo tiempo, proyectan la tendencia mundial futura de la generación eléctrica con origen nuclear.

En los próximos subapartados se describirá de manera cualitativa el ciclo de vida general de una central nuclear desde la fase de construcción y sus tareas asociadas, pasando por la operación normal de la planta para finalmente concluir con la clausura y desmantelamiento de la central. Además, se describirán los aspectos básicos de cada una de las tecnologías seleccionadas para el estudio y se analizará el ciclo de combustible completo desde la extracción y minería hasta la gestión definitiva del combustible nuclear irradiado. Para cada una de estas fases se identificarán los efectos medioambientales potenciales con el fin de caracterizarlos para su posterior estudio cuantitativo en el ACV propiamente dicho que se desarrollará en el apartado 4.

3.1. Fases de la vida de una central nuclear: construcción, operación y desmantelamiento.

La vida completa de una central nuclear comienza con su planificación y finaliza con su clausura. Con ello, se abarcan tres fases distintas: la construcción, la operación y el desmantelamiento. Durante cada una de las fases anteriores se han de desarrollar un conjunto de tareas específicas que conllevan una serie de posibles impactos asociados a aspectos medioambientales.

En general, para los tres tipos de tecnologías analizadas en el presente estudio se pueden detectar dos diferencias fundamentales que aplican a cada una de las tres fases de la vida de la planta. Por un lado, como se desarrollará en el apartado 3.2.2, existe un factor de escala entre un reactor tipo SMR y los reactores LWR. El reactor SMR se caracteriza por su tamaño compacto con sus

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

consiguientes implicaciones: menor ocupación del terreno, disminución de los materiales necesarios para su construcción y simplificación de las tareas de desmantelamiento. Por otro lado, como se detalla en el apartado 3.2.3 los reactores HWR precisan de un recurso adicional para su operación: agua pesada. Por ello, la construcción, operación y desmantelamiento de la central nuclear tiene asociada la necesidad de una planta de producción de agua pesada con las implicaciones sobre el terreno que esto conlleva.

3.1.1.Construcción

La construcción y puesta en marcha de una planta de energía nuclear es un proyecto de gran envergadura. El proceso de construcción se estima en unos 6-8 años: seis años en el caso de una unidad y ocho años en el caso de dos.

En la planificación y construcción de una central nuclear se contemplan, como mínimo, las siguientes etapas de trabajo [4]:

- 1) Selección del emplazamiento (*Site Selection*).
- 2) Desarrollo de una infraestructura adecuada que garantice la cadena de suministros necesarios para la construcción. Habilitación de los centros de trabajo que alojen al personal relativo a la obra.
- 3) Replanteo de la obra. Movimiento de tierras.
- 4) Construcción y montaje de las estructuras: hormigón armado y montaje de estructuras de acero.
- 5) Montaje de componentes principales e instalación de equipos.
- 6) Instalación eléctrica e instrumentación y control.
- 7) Pruebas de inspección y control de calidad de los sistemas. Desarrollo de planos as-built.

Paralelamente al desarrollo de las fases 1-3 se gestiona la fabricación de componentes fuera del emplazamiento para su posterior recepción, montaje y equipamiento. En ocasiones, la fabricación de estos componentes tiene asociada la construcción de una infraestructura en las inmediaciones del emplazamiento que facilite la logística, la descarga, el montaje y el equipamiento

Desde el punto de vista medioambiental, dentro de la fase de construcción, el principal impacto viene marcado por las tareas de excavación e ingeniería civil. El trabajo de esta fase incluye, entre otras cosas, trabajos de cantera, voladura de rocas y nivelación del terreno. Las masas de tierra generadas en el proceso se almacenan temporalmente en el área de la planta.

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

En el proceso de **construcción de la planta** se identifican los siguientes flujos que pueden suponer impactos al medio ambiente. Estos son: los elementos de construcción y materiales empleados, así como las emisiones y los residuos correspondientes. A continuación, se adjunta la información:

Tabla 1. Entradas y salidas en la fase de construcción de la planta.

RECURSOS y MATERIALES	ENERGÍA	EMISIONES Y RESIDUOS
Aluminio	Energía de red	Emisiones al aire como partículas, gases de efecto invernadero
Hormigón	Gasolina	Efluentes al agua
Acero de baja aleación		Residuos inertes
Otros elementos de construcción ²		

3.1.2. Operación

Como se describirá en la sección 3.2, el funcionamiento de una central nuclear sigue el principio básico de otras tecnologías de producción termoeléctrica: calentar un volumen de agua, producir un cambio de fase en dicho volumen, accionar los álabes de una turbina mediante el vapor producido y transformar la energía mecánica en energía eléctrica a través de un transformador. Sin embargo, la diferencia entre las distintas tecnologías termoeléctricas radica en la manera de obtener el calor que produce ese cambio de fase. En el caso de la energía nuclear el calor proviene de reacciones de fisión en el núcleo del reactor. El combustible necesario para dicha reacción nuclear es el isótopo U-235 que, como se detallará en el punto 3.2, sigue un ciclo de extracción y producción muy particular. Como consecuencia de esta diferencia, la operación de una planta nuclear a potencia precisa de una serie de recursos concretos y conlleva un conjunto de interacciones con el medio que se analizarán a continuación.

² Elementos en menor proporción como otros metales como cobre, maderas, materiales cerámicos, etc.

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

Una característica fundamental de la producción de energía nuclear es la necesidad de preservar la función de seguridad de refrigeración del núcleo del reactor. Para ello, toda central nuclear debe emplazarse en un punto geográfico con acceso a grandes volúmenes de agua ya sean ríos, embalses o el mar. Esta necesidad supone un consumo de recursos del entorno así como un impacto directo sobre los volúmenes de agua. La central nuclear toma agua del embalse, río o mar y, tras su utilización, la devuelve con el consiguiente efecto sobre el medio ya que la temperatura del canal de descarga suele ser mayor que la de la extracción.

En cuanto al consumo de recursos químicos, para el correcto funcionamiento de las centrales nucleares resulta necesario el empleo de ciertos productos químicos con el fin de llevar a cabo funciones de mantenimiento, control, operación y alimentación de equipos. Se estima que una central nuclear utiliza unas 200 toneladas (aprox.) de distintos productos químicos anualmente [5]. Uno de los usos principales de estos productos químicos está destinado al tratamiento de las aguas de planta como, por ejemplo, la desalinización y acondicionamiento del agua empleada en los sistemas de circulación de la planta. Por otro lado, es frecuente el empleo de productos químicos durante la limpieza de los equipos y las tuberías de las líneas de vapor. Además, como parte de la operación del núcleo de reactor, es necesario contar con reservas de ácido bórico para controlar la reactividad en algunos reactores tipo LWR. Las bases y ácidos utilizados con mayor frecuencia son, entre otros, hidróxido de sodio, ácido sulfúrico y ácido bórico y se almacenan en tanques con volúmenes de 20-50 m³. Finalmente, la planta necesitará contar con reservas de determinados gases como hidrógeno, oxígeno o nitrógeno para realizar ciertas operaciones.

Además de los productos químicos anteriormente nombrados, se necesitan ciertas cantidades combustible para alimentar los equipos diésel de emergencia así como aceites para lubricar la maquinaria de rotación. Las reservas de combustible para la alimentación de los equipos diésel de emergencia son de 1.000-2.000 toneladas al año [5].

Por otro lado, la operación normal de la planta conlleva la generación de una serie de efluentes líquidos y gaseosos que son liberados de forma controlada al medioambiente a través del canal de descarga en caso de efluentes líquidos y a través de la chimenea en caso de efluentes gaseosos. Los efluentes se pueden clasificar atendiendo a su naturaleza en cuatro grandes grupos: gases nobles, tritio, halógenos y partículas. A modo de ejemplo, en las siguientes tablas se muestra una relación de algunos de los isótopos liberados en una central nuclear tipo PWR, distinguiendo la fase en la que se encuentran y el grupo en el que se clasifican [6]. Este isotópico varía en función de la planta.

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

Tabla 2. Ejemplo del isotópico de efluentes gaseosos para una central tipo PWR.

Efluentes gaseosos	
Gases Nobles	Ar-41, Kr-85, Kr-85m, Kr-87, Kr-88, Xe-131m, Xe-133, Xe-133m, Xe-135, Xe-135m, Xe-138
Halógenos	I-131, I-132, I-133, I-134, I-135
Partículas	Ba-140, Ce-141, Ce-144, Co-58, Co-60, Cr-51, Cs-134, Cs-136, Cs-137, Cs-138, Fe-59, La-140, Mn-54, Mo-99, Na-24, Nb-95, Np-239, Sb-122, Sb-124, Sb-125, Sr-89, Sr-90, Tc-99m, Te-123m, Te-132, Zn-65, Zr-95
Tritio	H-3

Tabla 3. Ejemplo del isotópico de efluentes líquidos para una central tipo PWR.

Efluentes líquidos	
Gases Nobles	Ar-41, Kr-85m, Kr-87, Kr-88, Xe-133, Xe-133m, Xe-135
Halógenos	I-131, I-132, I-133, I-134, I-135
Partículas	Ag-110m, Ba-140, Ce-144, Co-58, Co-60, Cr-51, Cs-134, Cs-136, Cs-137, Cs-138, Fe-59, La-140, Mn-54, Mo-99, Na-24, Nb-95, Sb-124, Sb-125, Sr-89, Sr-90, Tc-99m, Te-123m, Zr-95
Tritio	H-3

Estas emisiones están controladas por los organismos reguladores de cada país y se encuentran siempre por debajo de unos márgenes de seguridad establecidos en la normativa aplicable. Además, el explotador emite informes mensuales con las descargas registradas ya sean líquidas o

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

gaseosas (en tandas o en continuo) de manera que se puede estudiar la progresión de las emisiones de manera anual. La tendencia general de estas emisiones es que, con las implementaciones de nuevos sistemas de planta, la concentración de estos efluentes disminuye con el tiempo.

Además de lo anterior, en las centrales nucleares se generan residuos radiactivos de diversa índole, aunque de acuerdo a sus etapas posteriores de gestión, pueden distinguirse dos tipos:

- Combustible Usado y Residuos de alta actividad.
- Residuos de baja y media actividad.

En la operación normal de la central nuclear los residuos de alta actividad generados provienen del combustible irradiado que, tras cumplir el ciclo de quemado correspondiente, se extrae del núcleo del reactor para su almacenamiento en piscinas (ver apartado 3.3.5). En menor medida, también puede existir un porcentaje de residuos de alta actividad que provienen de componentes del primario.

El origen de los residuos radiactivos de baja y media actividad durante la operación de las centrales nucleares está en la radiactividad contenida en el refrigerante del núcleo del reactor. Los productos de fisión y de activación escapan inevitablemente, en cantidades moderadas, del circuito primario a través de diferentes puntos y mecanismos concretos, dando lugar a la aparición de residuos radiactivos en diferentes sistemas y zonas de una central nuclear.

La mejora continua de las prácticas de operación y mantenimiento por una parte y ciertas inversiones en los sistemas de proceso por otra, han permitido una reducción importante de los volúmenes de residuos finalmente acondicionados en las centrales.

Durante el **proceso de la operación de la planta** se identifican las siguientes entradas y salidas del proceso como posibles flujos que generen impactos a los diferentes niveles ambientales.

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

Tabla 4. Entradas y salidas en la fase de operación de la planta.

RECURSOS y MATERIALES	ENERGÍA	EMISIONES Y RESIDUOS
Agua de Refrigeración	Diesel para generadores	Residuos peligrosos (combustible gastado)
Dioxido de Carbono	Electricidad de la red	Residuos no peligrosos
Químicos Orgánicos		Agua
Aceites lubricantes		Efluentes líquidos y gaseosos de diferentes compuestos radiactivos

Es importante destacar en esta etapa del ciclo que la propia operación de la planta no genera emisiones de gases de efecto invernadero. Principal elemento diferenciador del resto de tecnologías de generación energética basadas en combustibles fósiles.

3.1.3.Desmantelamiento

Usualmente, se definen tres etapas o fases diferentes en los desmantelamientos de las centrales nucleares [7]. A continuación, se describen estos tres niveles analizando el estado de la planta y los equipos para cada uno de dichos niveles.

Nivel 1

Estado de la planta y de los equipos: En esta fase se retiran los elementos combustibles irradiados, las barras de control y los líquidos contaminados. Se mantiene la barrera contra la contaminación (circuito primario) tal y como estaba durante la operación de la planta, pero los sistemas abiertos se cierran y sellan (válvulas, tapones, penetraciones, etc.). Durante este periodo, se mantiene el edificio de contención en situación operativa (en condición estanca) para evitar cualquier liberación de material radiactivo. Igualmente se mantiene bajo control la atmósfera interior de la contención (humedad, radiactividad, temperatura).

Nivel 2

Estado de la planta y de los equipos: La barrera contra la contaminación (el circuito primario) se reduce a su mínimo tamaño, retirando las partes más fácilmente desmontables, y se cierran o sellan

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

las penetraciones en la barrera que permanece aún. El sellado de la barrera se refuerza por medios físicos y, si es necesario, se añade un blindaje biológico que encierra la citada barrera. Después de descontaminar hasta niveles considerados como aceptables, el edificio de contención y los sistemas de ventilación pueden ser modificados o eliminados si ya no son necesarios para la protección radiológica). Las partes y edificios no radiactivos en la instalación pueden ser reconvertidos para otros fines. Los materiales no contaminados o suficientemente descontaminados pueden ser reutilizados fuera de la instalación.

Nivel 3

Estado de la planta y de los equipos: Los materiales, equipos y partes de la planta que tengan niveles de radiactividad significativos con respecto al fondo ambiental después del proceso de descontaminación, se retiran del emplazamiento. Todas las partes restantes deben tener niveles de contaminación por debajo de los límites autorizados y su impacto radiológico debe ser muy similar al del fondo radiactivo natural del emplazamiento. La instalación queda desmontada por completo y su emplazamiento puede ser destinado a otros fines sin ningún tipo de repercusiones desde el punto de vista de la protección radiológica.

Unos de los aspectos que merecen destacarse en el desmantelamiento de las centrales nucleares es la gestión del gran volumen de materiales residuales que se generan. En definitiva el desmantelamiento consiste conceptualmente en el desmontaje y troceado de las estructuras y sistemas de la central, y en el acondicionamiento y expedición de distintos bultos de materiales que cumplan determinados criterios de aceptación. Este proceso implica establecer un sistema de segregación y gestión de las distintas corrientes de los materiales residuales, de manera que el flujo de las distintas corrientes se pueda controlar de manera rigurosa manteniendo en todo momento la trazabilidad de los mismos. La mayoría de los materiales residuales generados en los desmantelamientos son materiales residuales convencionales sin contaminación radiactiva.

Del resto de materiales residuales la mayoría presenta una contaminación radiactiva baja o muy baja. Una pequeña proporción de estos materiales, que dependerá fundamentalmente de la historia operativa y de los incidentes habidos en la central, deberán acondicionarse y gestionarse como residuos de baja y media actividad. Sólo algunos materiales en contacto o próximos al núcleo del reactor, como los internos, la vasija, etc., intensamente activados durante la operación al haber estado sometidos a intensos flujos neutrónicos, pueden ser considerados como residuos de alta actividad. El volumen de los residuos que deben ser tratados y almacenados disminuye a medida que va transcurriendo el tiempo desde el fin de la operación. Por tanto, también por el interés en la

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

reducción del volumen de residuos radiactivos generados, es adecuado demorar determinadas etapas de desmantelamiento. El problema básico de estos residuos no es su actividad sino su volumen. La Agencia de Energía Nuclear de la OCDE estima que el volumen medio de los residuos generados durante el desmantelamiento de una central nuclear de potencia está entre los 10.000 y los 15.000 metros cúbicos por cada gigavatio eléctrico de potencia de la central desmantelada [7]. En este sentido el uso o no de técnicas de descontaminación, compactación y reducción de volumen de materiales residuales radiactivos son de gran importancia en el planteamiento de la estrategia de desmantelamiento de las instalaciones, ya que pueden reducir significativamente el volumen final de residuos radiactivos a gestionar.

Del total de acero resultante en el desmantelamiento de una central de un gigavatio, cerca del 50% es potencialmente reutilizable. Asimismo, de las 180.000 toneladas de hormigón que resultarían, unas 13.500 toneladas estarían potencialmente contaminadas y unas 4.700 toneladas potencialmente activadas. El volumen de residuos, si bien es elevado, sólo representa una fracción del orden del 1% con respecto al total de residuos de baja y media actividad generados por la elaboración del combustible y la operación de una central nuclear durante un período de 25 años (según estimaciones basadas en documentos de NEA/OCDE [8] [9] [10]) [7].

En el **desmantelamiento** de la planta van a identificarse principalmente consumos de energía y residuos como elementos causantes de los impactos ambientales del proceso.

Tabla 5. Entradas y salidas en la fase de desmantelamiento.

ENERGÍA	EMISIONES Y RESIDUOS
Energía de red	Emisiones al aire como partículas, gases de efecto invernadero
Gasolina	Efluentes al agua como sólidos suspendidos, sulfatos, entre otros
	Residuos inertes
	Residuos peligrosos

3.2. Descripción de tecnologías de generación nuclear

Como se ha indicado en apartados anteriores, el presente estudio queda restringido al análisis de tres tipos de tecnologías nucleares: LWR, HWR y SMR. Con el fin de conocer los aspectos básicos de cada una de las tecnologías e identificar sus características de diseño diferenciadoras, a continuación se describen de forma cualitativa los tres tipos de reactores en cuestión [11].

3.2.1. Reactores de Agua Ligera o *Light Water Reactor* (LWR)

Los Reactores de Agua Ligera constituyen la tecnología de generación nucleoelectrónica dominante en todo el mundo. La característica básica de los reactores LWR es el empleo de agua ligera como refrigerante y moderador. Dentro de este tipo de reactores, se distinguen, a su vez, dos diseños diferentes: los Reactores de Agua a Presión o *Pressurizer Water Reactor* (PWR) y los Reactores de Agua en Ebullición o *Boiling Water Reactor* (BWR).

De los 450 reactores nucleares que operan hoy en día, un total de 294 reactores son PWR seguidos en número por los reactores BWR que alcanzan la cifra de 75 reactores en operación. Actualmente, el resto de tecnologías cuentan con un número notablemente menor de reactores en operación (ver Figura 3-2).

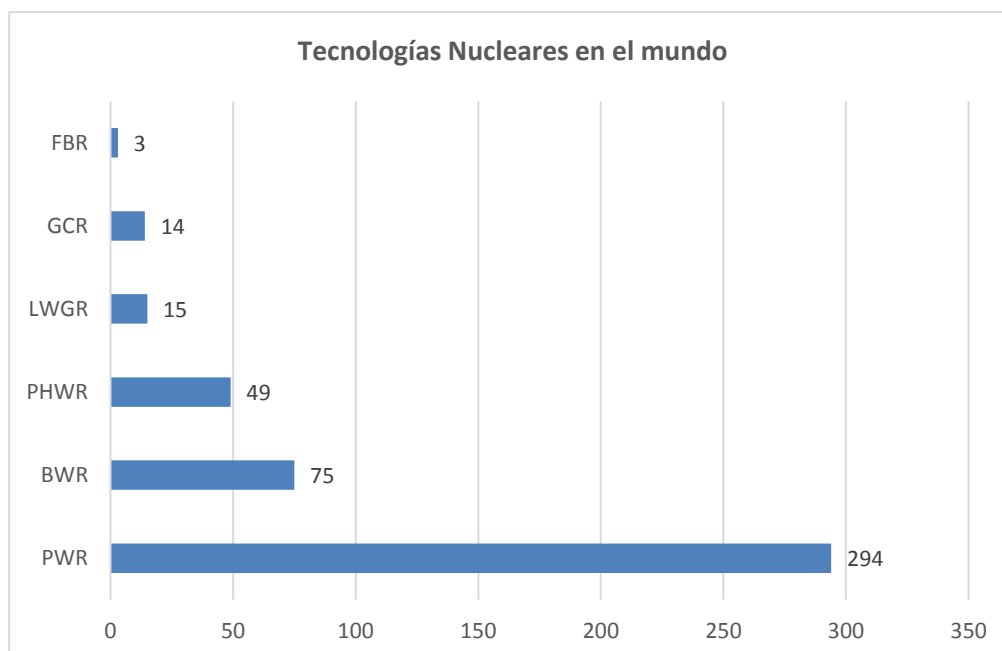


Figura 3-2. Número de reactores en el mundo según las distintas tecnologías nucleares [3].

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

En vista de la gráfica anterior, se puede concluir que los reactores PWR son los más extendidos en todo el mundo frente a otro tipo de tecnologías nucleares. En particular, dentro de los Reactores de Agua Ligera, el número de PWR es considerablemente mayor con respecto a los BWR. Por ello, como se justificará en el apartado 4.2.1 donde se llevará a cabo el Inventario del Análisis de Ciclo de Vida, para este estudio se tomarán los reactores PWR como referencia de los LWR.

La característica básica de los Reactores de Agua a Presión es que el agua, que actúa como refrigerante, permanece líquida a su paso por el reactor. Como consecuencia de esta opción de diseño, el vapor necesario para accionar la turbina se ha de generar en un componente diferente que esté a menor presión que la del circuito primario, entendiendo por primario el conjunto de tuberías a través de las cuales pasa el refrigerante por el reactor. Los reactores PWR más comunes son capaces de alcanzar una potencia unitaria de 3000 MW térmicos y se distribuyen en tres lazos. Cada lazo tiene un generador de vapor y una bomba de recirculación. En el generador de vapor, el agua del primario cede su energía al secundario, que entra en ebullición. El agua del primario retorna al reactor gracias a la impulsión de las bombas.

Existe un componente adicional que aparece solo en una de las ramas: el presionador. Este sistema actúa para regular la presión de trabajo del circuito primario y tiene como función inyectar o extraer agua del circuito según se necesite aumentar la presión de este o disminuirla.

En el circuito secundario se realiza, estrictamente hablando, el ciclo termodinámico, pues en él se encuentra el generador de vapor o foco caliente, la turbina, el condensador y las bombas de condensado, que vuelven a presionar el fluido hasta las condiciones de trabajo del secundario del generador de vapor. El generador de vapor consiste en un intercambiador de calor en el que el agua del circuito secundario sufre un cambio de fase mientras que el agua del primario permanece en fase líquida. Aunque existen varias disposiciones geométricas para realizar esta transferencia de calor de un lado al otro del circuito, todas ellas adoptan el criterio de introducir el agua caliente del primario por la parte interna de unos tubos de transmisión, por cuyo exterior viaja el fluido secundario que se transforma en vapor, pues éste tiene mayor volumen específico.

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

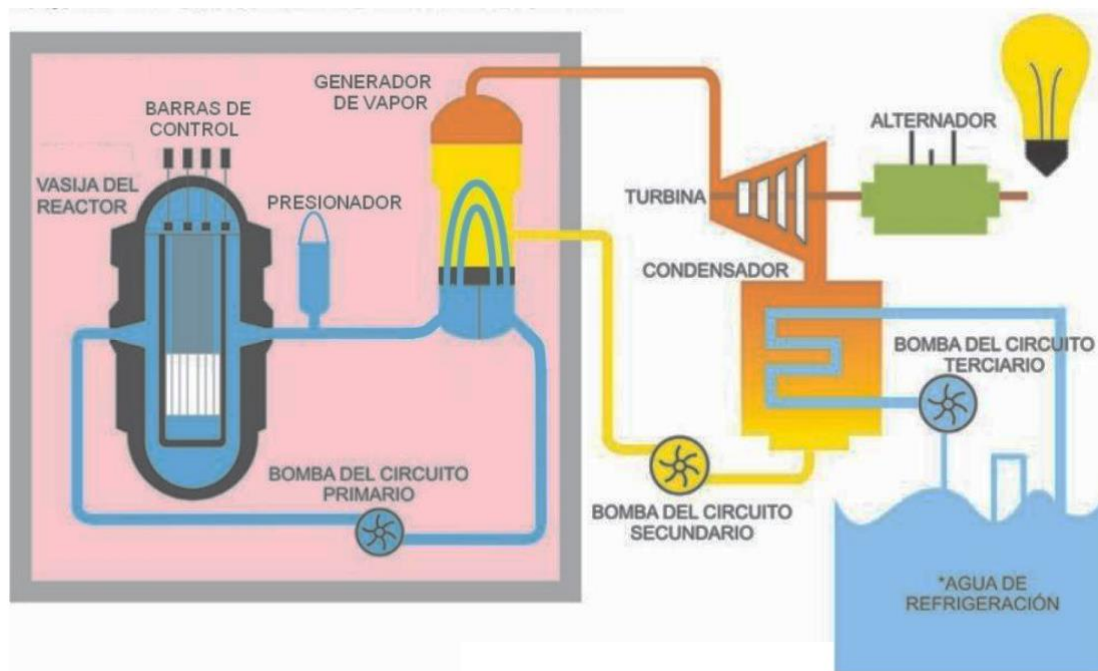


Figura 3-3. Esquema básico de un reactor PWR [12].

El reactor se halla inserto en una vasija de acero de medio metro de espesor aproximadamente, provista de una tapa que va embridada a la vasija en condiciones nominales de funcionamiento, y que puede retirarse de la misma para proceder a la recarga del combustible.

El combustible ocupa el lugar inferior del espacio hueco de la vasija, estando en la parte superior los elementos guía de las barras de control que en número parcial estarán fuera del combustible durante el funcionamiento nominal. El refrigerante entra en la vasija del reactor por las toberas de entrada conectadas a las ramas frías del circuito primario, procediendo de las bombas de recirculación y tras bajar por la zona periférica del anillo de la vasija llegan a su espacio inferior. Desde allí suben verticalmente lamiendo las vainas del combustible y proceden a su refrigeración.

El refrigerante emerge por la parte superior del núcleo y se distribuye a través del amplio espacio superior hacia las toberas de salida que conectan con las tuberías conducentes a los generadores de vapor.

El combustible va encapsulado en vainas de aleación de zirconio para evitar que los productos radiactivos que se generan en el combustible durante el funcionamiento de la central puedan pasar al refrigerante y posteriormente al medio circundante.

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

El combustible se fabrica en forma de pastillas de dióxido de uranio enriquecido (UO_2), con una concentración de U-235 sobre el uranio total del orden del 3%-4% dependiendo de la planta. Las dimensiones de las pastillas son de algo menos de 1 cm de diámetro y unos 2,4 cm de altura y se apilan en el interior de la vaina, manteniéndose firmes mediante la presión de un muelle vertical instalado en el tapón de la vaina a la par que se presuriza ligeramente el interior con un gas inerte para mejorar la transferencia de energía en la interfaz combustible-vaina. En la parte superior de la vaina queda un espacio hueco para alojar los productos de fisión gaseosos que escapan de las pastillas de combustible.

Las vainas así cargadas, que tienen aproximadamente 1 cm de diámetros y unos 4 m de altura (de los cuales 260 cm son de altura activa, es decir, combustible real) se agregan formando lo que se denomina elemento combustible, que es la pieza unitaria de movimiento de combustible en el interior del reactor. La constitución de estos elementos obedece a una estructura reticular cuadrangular, formando en su interior figuras prismáticas de unos 21 cm de lado y 4 m de altura. Existe un pie y un cabezal para alojar las vainas en su posición correspondiente y darles la pertinente rigidez mecánica. También disponen una serie de rejillas espaciadoras a diversas alturas de las vainas, con objeto de mantener éstas en la posición debida y evitar aproximaciones entre vaina que produzcan puntos de escasa refrigeración que alcancen temperaturas muy altas.

Al final de cada ciclo de operación, que dura entre 12 y 14 meses, se ha de recargar el reactor extrayéndose los elementos combustibles gastados e insertando otros nuevos (elementos combustibles frescos).

3.2.2. Reactores Modulares o *Small Modular Reactor* (SMR)

Los Reactores Modulares o Small Modular Reactor (SMR) son un tipo de reactores avanzados capaces de producir hasta 300 MWe de potencia. Sus características principales son su reducido tamaño y la versatilidad que ofrecen en la fase de construcción. La totalidad de la planta se divide en varios módulos que se construyen de forma separada y se transportan a los emplazamientos en cuestión donde surge la demanda. Una vez allí, tiene lugar la integración de cada módulo y la instalación completa de la planta.



Figura 3-4. Planta prototipo SMR (NuScale) [13].

Hoy en día, ningún país del mundo cuenta con un reactor SMR en operación. Existen alrededor de 50 diseños y conceptos de SMR en todo el mundo. La mayoría se encuentran en distintas etapas de desarrollo y la implantación de alguno de ellos comienza a considerarse. Actualmente hay cuatro SMR en fase de construcción avanzada en Argentina, China y Rusia. Muchos otros países de tradición nuclear o, incluso, recién iniciados en el sector, están en fase de investigación y desarrollo en el área de los SMR. Sin embargo, al ser reactores de nuevo diseño, el proceso de licenciamiento de los Organismos Reguladores está retrasando la implantación de los SMR. A pesar de que los reactores modulares son de menor tamaño, las tareas de licenciamiento (certificaciones de diseño, construcción, licencia de operación...) no han de ser necesariamente menores que las de los reactores convencionales.

Existen distintas tecnologías planteadas para los SMR que, como si de una central nuclear convencional se tratara, se diferencian en diversos aspectos de diseño como el moderador, el refrigerante, las energías de los neutrones que inducen la fisión, el combustible, etc.

Como se justificará en el apartado 4.2.2, para el presente estudio se tomarán los reactores SMR que adoptan el diseño de los reactores LWR escalados a dimensión de los reactores modulares. Aunque algunos diseños de SMR están pensados para su implantación en aplicaciones navales, este tipo de SMR basados en los LWR suelen estar diseñados para su construcción en tierra.

Las características básicas del SMR tipo LWR son similares a las descritas en el subapartado 3.2.1 para PWR con la particularidad de que, en el caso de los reactores modulares, los componentes quedan escalados a una generación de potencia menor.

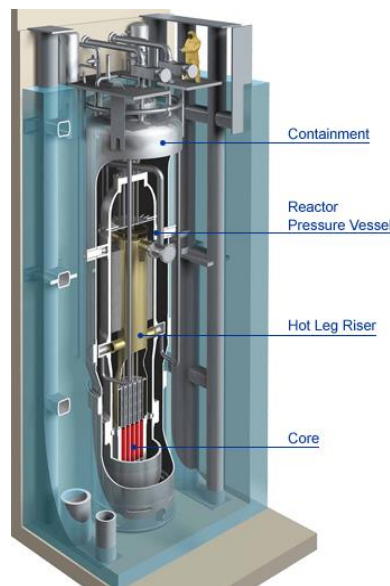


Figura 3-5. Esquema básico de un reactor SMR.

En los últimos años, el interés sobre este tipo de reactores se ha visto incrementado debido a las ventajas que ofrecen desde el punto de vista del diseño, la seguridad, los aspectos económicos, etc. Algunas de estas ventajas se enumeran a continuación:

- Capacidad de adaptación flexible de acuerdo con las necesidades energéticas de cada región marcadas por las condiciones geográficas o la infraestructura eléctrica.
- Versatilidad en el proceso de construcción de la planta gracias a la posibilidad de dividir la fabricación de componentes por módulos.
- Mejora de la seguridad como consecuencia de los sistemas de seguridad pasiva que incorporan a este tipo de reactores.
- Desde el punto de vista económico, mejoran la asequibilidad del coste de capital inicial.

3.2.3. Reactores de Agua Pesada o Heavy Water Reactor (HWR)

Los Reactores de Agua Pesada o *Heavy Water Reactor* (HWR) son un tipo de reactores nucleares diseñados para utilizar uranio natural como combustible y agua pesada como moderador de neutrones.

A comienzos de 2001, los Reactores de Agua Pesada representaban aproximadamente el 7,8% del total de reactores de generación nucleoelectrónica en el mundo y el 4,7% en términos de capacidad de todos los reactores en funcionamiento [14]. La tecnología HWR ofrece flexibilidad de

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

combustible, bajos costes operativos y un alto nivel de seguridad. Por lo tanto, representa una opción interesante para los países que están considerando programas de energía nuclear.

Los Reactores de Agua Pesada más globalmente extendidos son los Reactores de Agua Pesada a Presión canadienses (CANDU) y los HWR indios.

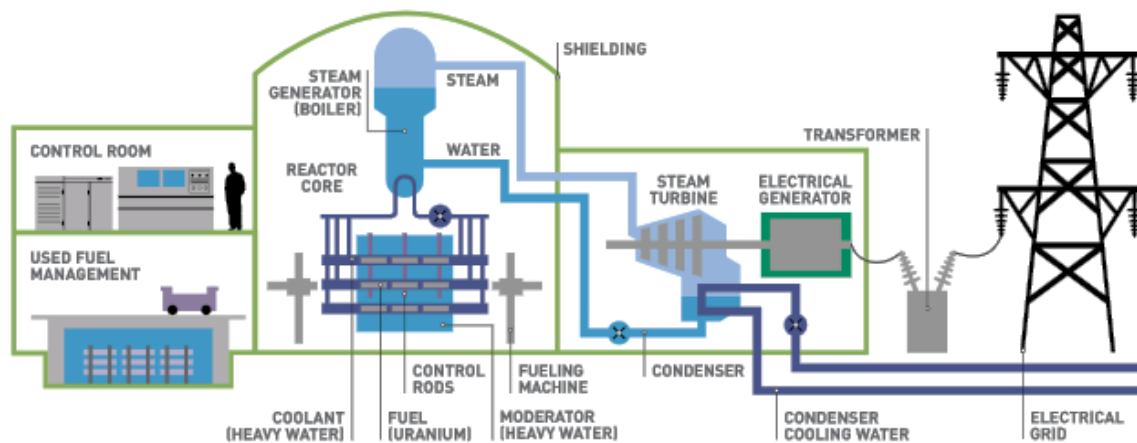


Figura 3-6. Esquema básico de un reactor HWR [15].

Estos reactores obedecen a un concepto similar al de los Reactores de Agua a Presión, pero la configuración del reactor nuclear y su circuito primario son distintos al del PWR. Disponen de unos generadores de vapor en los cuales se produce la transferencia de calor del circuito primario al secundario, al igual que en los PWR. Sin embargo, el circuito primario consta de un reactor contenido en una gran calandria o tanque de agua pesada fabricado en acero inoxidable austenítico. Este tanque se ve atravesado por los canales (Zr-2.5%Nb) donde se aloja el combustible.

Estos canales van refrigerados también por agua pesada, aunque en este caso no se mezcla con la que constituye la masa de moderador, pues el agua pesada interna o próxima al combustible tiene la misión fundamental de refrigeración y debe alcanzar una temperatura suficiente para la producción de vapor en los generadores anteriormente citados. Este reactor emplea varios cientos de tubos de presión en lugar de una vasija de presión única.

En este tipo de reactores se produce la recarga del combustible de modo continuo (online) de manera que los elementos combustibles entran por uno de los extremos del canal de combustible y salen por el otro, según la pauta de gestión que se haya establecido. Los elementos combustibles se constituyen también como una agregación de varillas de dióxido de uranio envainadas. De igual manera, cada pastilla de combustible tiene geometría cilíndrica.

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

Las características básicas que comparten los HWR se resumen en los siguientes puntos:

- Una economía neutrónica que permite el uso práctico del ciclo del combustible abierto con uranio natural.
- La recarga de combustible durante el funcionamiento del reactor, lo que ofrece varios beneficios fundamentales: factores de capacidad más elevados mediante la eliminación de paradas periódicas para la recarga de combustible, menos necesidad de reactividad internuclear y mecanismos de control de la distribución del flujo, sustitución en funcionamiento del combustible defectuoso, y fácil acceso para la inspección en servicio.

Como se ha indicado anteriormente, en la actualidad, la mayoría de los HWR emplean como combustible uranio natural, a menudo con objeto de independizarse de las instalaciones de enriquecimiento del uranio. El plutonio y el uranio procedente del combustible gastado de Reactores de Agua Ligera también pueden ser quemados eficazmente en los diseños actuales de HWR, lo cual establece un sinergismo entre los HWR y los LWR.

Por razones ligadas fundamentalmente a la alta inversión específica que se ha de realizar durante la construcción, estos reactores han tenido un despliegue comercial relativamente modesto, restringido fundamentalmente a Canadá con algunas excepciones en Sudamérica y Asia. No obstante, cabe señalar que este tipo de reactores tienen unos factores de carga elevadísimos y, en general, unas prestaciones muy positivas como consecuencia de sus características intrínsecas como, por ejemplo, el mecanismo de recarga continua.

3.2.3.1. Planta de producción de agua pesada

Los reactores tipo HWR emplean agua pesada como moderador de neutrones. El agua pesada es óxido de deuterio, es decir, agua cuya composición química está constituida por dos átomos de deuterio, isótopo del hidrógeno (D_2O).

En la naturaleza, la abundancia del agua deuterada es de 1 molécula de agua pesada frente a 3200 moléculas de agua convencional. Por ello, es necesario construir plantas de producción de agua pesada para su uso en las centrales nucleares de agua pesada.

En los sesenta y cinco años después de su descubrimiento, el agua pesada se producía en un total de diez países llegando a alcanzar cifras de 30 000 toneladas en todo el mundo, de los cuales, aproximadamente el 60% se generaba en Canadá. Esta producción inicial se logró mediante electrólisis en una planta en Noruega en 1935 (todavía en operación), seguida de una planta en

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

Trail (Columbia Británica), que también utilizó electrólisis y un intercambio catalizado de deuterio entre hidrógeno y agua, con su posterior enriquecimiento por electrólisis.

Años más tarde, se desarrollaron y perfeccionaron nuevas técnicas de producción de agua pesada y se pusieron en marcha distintas plantas en varios países como Estados Unidos, Canadá, Rumanía o India. De entre todas las técnicas de producción cabe destacar el proceso the Girdler-Sulfide (GS), considerado en el presente estudio.

En la década de 1990, dos plantas de agua pesada comenzaron a funcionar en la India, así como una en Argentina, mientras que las plantas de agua pesada que permanecían en operación en Canadá dejaron de funcionar.

La producción de agua pesada requiere de gran cantidad de vapor de agua y energía para obtenerse, los principales flujos de entradas y salidas se describen a continuación:

Tabla 6. Entradas y salidas en la fase de producción de agua pesada.

RECURSOS y MATERIALES	ENERGÍA	EMISIONES Y RESIDUOS
Agua	Electricidad de la red	Emisiones de partículas, gases de efecto invernadero, entre otros
Compuestos inorgánicos	Gas natural para obtención de vapor de agua	Agua

La construcción de la planta de agua pesada se puede asemejar a la construcción de la planta de generación en cuanto a elementos de construcción, a nivel general se identifican las siguientes entradas y salidas de este proceso:

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

Tabla 7. Entradas y salidas en la fase de construcción de la planta de agua pesada.

RECURSOS y MATERIALES	ENERGÍA	EMISIONES Y RESIDUOS
Elementos de construcción	Electricidad	Emisiones de gases de efecto invernadero, partículas, entre otros.
Metales y sus aleaciones	Combustibles	Agua
		Residuos no peligrosos

3.3. Ciclo de combustible nuclear

Todas las tecnologías de generación eléctrica precisan de una materia prima para producir electricidad. El ciclo mediante el cual se produce la extracción, procesado, consumo y gestión de la materia prima o combustible varía de una tecnología a otra. A la hora de comparar implicaciones medioambientales de las distintas tecnologías de generación, es fundamental conocer en detalle el proceso por el cual un recurso natural se transforma en materia prima para la generación eléctrica, es decir, el ciclo de combustible.

En el caso de la energía nucleoelectrónica, la materia prima base es el uranio. El ciclo de combustible nuclear comprende todas las fases del proceso, desde la extracción del mineral de uranio para la fabricación del combustible nuclear hasta la gestión definitiva de los residuos radiactivos generados por las centrales nucleares. En cada uno de los estadios comprendidos entre la minería y la gestión de residuos, existe una serie de impactos medioambientales tanto radiológicos como atmosféricos con una repercusión directa sobre las personas y el medioambiente. Cabe cuestionarse de qué manera se produce ese impacto y cuáles son las vías de emisión y exposición teniendo en cuenta el ciclo de combustible nuclear completo, así como distintas tecnologías de generación eléctrica con origen nuclear.

Con el fin de conocer y caracterizar estos efectos, el presente apartado pretende ofrecer una descripción detallada del ciclo de combustible nuclear completo. Para ello, se estudiarán cada una de las fases del ciclo [16].

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

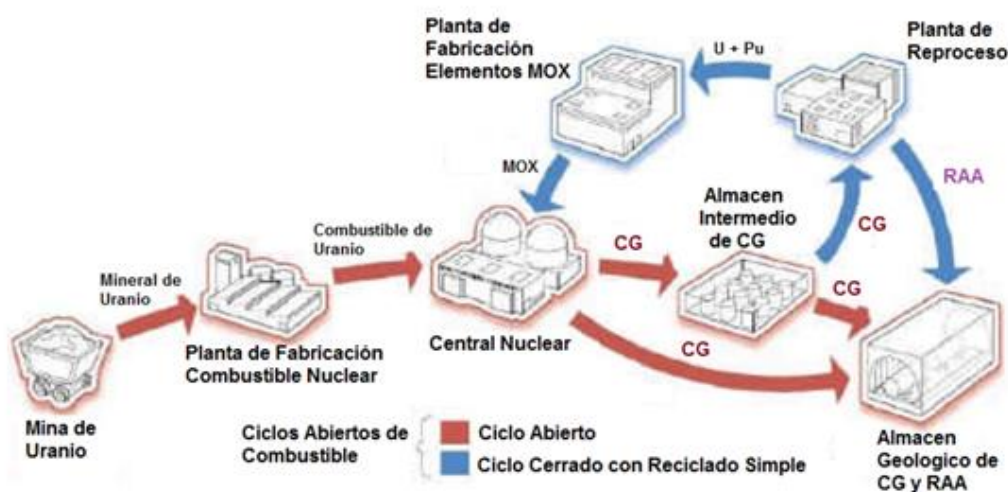


Figura 3-7. Esquema reducido el ciclo de combustible nuclear.

3.3.1. Minería y fabricación de concentrados

La parte del ciclo de combustible considerado en este apartado comprende la extracción del mineral y la producción de concentrados de uranio a partir de las menas³ extraídas.

El país del mundo en donde se estiman mayores reservas de uranio es Australia, seguido de Kazajstán y de Canadá.

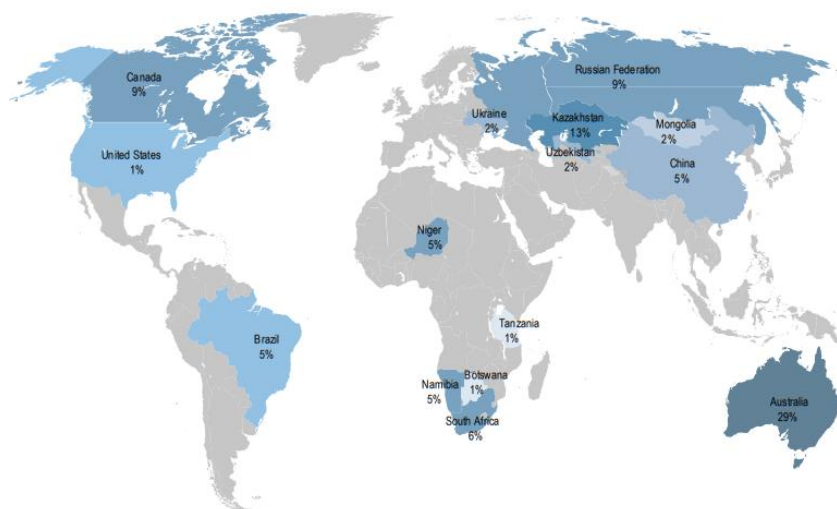


Figura 3-8. Reservas de uranio en el mundo OCDE [17].

³ "Mineral sin limpiar, tal como se extrae de la mina".

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

Antes de la extracción del uranio se procede a realizar prospecciones del terreno. La prospección de uranio pretende localizar concentraciones de mineral que puedan ser yacimientos explotables. La existencia del mineral viene avalada por la presencia de gas radón, producto de la cadena de desintegración del uranio que conlleva consecuencias radiológicas desde el punto de vista de la generación de residuos. Existen distintos métodos de prospección como los métodos directos (radiométricos, geoquímicos...) o los métodos indirectos (mineralógicos, litológicos...) o métodos auxiliares (geofísicos, sondeos...). La tendencia habitual es emplear una combinación de ellos.

La explotación del uranio suele hacerse con minas a cielo abierto, siendo el arranque de zafras mediante explosivos y ripado el método más común de explotación. Antes de que la mena de uranio pueda ser extraída del yacimiento, debe eliminarse un considerable volumen de estériles y de zafras de baja ley, para permitir el acceso a la mena productiva. También existen explotaciones de uranio subterráneas. Esta mena es extraída de la mina y transportada a la planta mineralúrgica donde es procesada para producir la "pasta amarilla" (*yellow cake*). Este compuesto contiene un mínimo de 65 % de uranio.

Aunque cada planta mineralúrgica se diseña específicamente para las características peculiares de la mena, los procesos usados por muchas plantas son semejantes y consta de las etapas básicas siguientes:

- 1) Preparación del mineral. Se trata de reducir el tamaño de las zafras para hacerlo accesible a los procesos químicos posteriores. Se realiza mediante trituración y molienda.
- 2) Lixiviación. Se realiza mediante lixivitaciones con disolventes adecuados y se fundamenta en la relativa facilidad con que el uranio del mineral se disuelve en estado oxidado. La lixiviación se puede hacer en medio ácido y en medio alcalino. Como resultado del proceso se obtiene sulfato de uranilo. La elección de uno u otro método dependerá de consideraciones químicas y económicas, las características del mineral, componentes de la ganga (yeso, calizas, etc.) y eficacia de las operaciones. Dentro de las formas de operación, se distingue la lixiviación estática que se realiza mediante riego sobre las eras de mineral que se van depositando en sucesivas capas apiladas a modo de dique; y la lixiviación dinámica, que emplea agitación mecánica, neumática y mixta.
- 3) Separación sólido-líquido. La pulpa obtenida por lixiviación se separa en dos fases: una acuosa, en la que se encuentra disuelto el uranio, y otra formada por residuos sólidos.
- 4) Concentración y purificación parcial. Principalmente se emplean técnicas de intercambio iónico o de extracción con disolventes orgánicos. El intercambio iónico se emplea en líquidos con muy

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

bajo contenido en uranio. La extracción con disolventes orgánicos resulta más versátil por su diseño y operación en continuo. El objetivo es concentrar y purificar (el líquido del que se parte tiene un contenido en U_3O_8 de 0,3 a 0,8 g/l).

5) Precipitación y secado. El uranio de la disolución purificada obtenida tiene que precipitarse, para lo cual se utiliza amoníaco o magnesia (si ha habido lixiviación ácida), o sosa cáustica (en caso de lixiviación alcalina). La suspensión creada se filtra y la pasta resultante se seca. Este producto final sólido se llama “yellow cake” (pasta o torta amarilla) y suele ser diuranato amónico, magnésico o sódico, o de un óxido resultante de su calcinación.

6) Envasado y almacenamiento. Dicha pasta sólida amarilla se envasa en bolsas de plástico que se introducen en bidones de acero. Su almacenamiento debe reunir una serie de condiciones de seguridad y disponer de adecuada protección física.



Figura 3-9. Producción de yellow cake.

La concentración del isótopo del uranio fisionable U-235 en el uranio natural es de alrededor del 0,70%, siendo prácticamente el resto del uranio natural del isótopo U-238. Esta baja proporción natural de U-235 es inferior a la requerida para iniciar una reacción nuclear de fisión en las centrales nucleares. Por ello, debe ser enriquecido aumentando su proporción de uranio fisionable U-235 para hacer viable su uso como combustible nuclear. Para enriquecer el uranio natural es necesario someter el concentrado de uranio obtenido en la fase anterior a una serie de procesos físicos y químicos. Finalmente, con el uranio enriquecido en las proporciones necesarias, se procede a fabricar el combustible que entrará en el reactor.

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

En los siguientes apartados se desarrollarán los procesos a los que se somete el concentrado de uranio para producir finalmente el combustible que se consumirá en el reactor nuclear.

Como se desarrolló en el apartado 3.2.3, las centrales nucleares tipo HWR no emplean uranio enriquecido como combustible nuclear, sino que son capaces de producir reacciones nucleares autosostenidas basadas en el uranio natural como combustible. Por tanto, todo lo que se desarrolla en estos apartados en relación a la conversión y el enriquecimiento, no aplica a los Reactores de Agua Pesada.

La etapa de la **minería y fabricación de concentrados** requiere de ciertos consumos de recursos y materiales, así como de efluentes y emisiones que se identifican de manera general en la siguiente tabla:

Tabla 8. Entradas y salidas en la fase de minería y fabricación de concentrados.

RECURSOS y MATERIALES	ENERGÍA	EMISIONES Y RESIDUOS
Transformación de la tierra	Diesel para generadores	Emisiones al aire como compuestos radiactivos, partículas, gases de efecto invernadero
Agua de Refrigeración	Diesel para maquinaria pesada	Residuos peligrosos
Uranio		Residuos no peligrosos
Ocupación del Terreno		Uranio y otros elementos
Explosivos		Efluentes al agua como sólidos suspendidos, sulfatos, entre otros

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

3.3.2. Conversión

El óxido U_3O_8 presente en el concentrado debe ser purificado y sobre todo transformado en un compuesto gaseoso (UF_6) necesario para la separación isotópica. Esta conversión utiliza procesos químicos completamente desarrollados.

La gran mayoría de los expertos coinciden en admitir que la conversión del concentrado de uranio en UF_6 , su enriquecimiento en U-235 y posteriormente reconversión en UO_2 genera pequeñas cantidades de residuos, tratándose en todos los casos de residuos de baja actividad que contienen sólo uranio y/o sus productos de desintegración. La fabricación de las pastillas de combustible, a partir del UO_2 en polvo no requiere transformaciones químicas, interviniendo sólo básicamente procesos mecánicos y térmicos en el proceso de fabricación.

Existen fábricas de conversión en Estados Unidos, Francia y Gran Bretaña. El procedimiento consta de las siguientes fases:

- Purificación. Obtiene como resultado una disolución de nitrato de uranilo $[(NO_3)_2(UO_2)]$ puro. En primer lugar, se diluye el concentrado en ácido nítrico para obtener nitrato de uranilo, que contiene impurezas. Posteriormente se filtra y se extrae el uranio con disolventes. Por último, se extrae mediante agua desmineralizada.
- Elaboración del hexafluoruro de uranio (UF_6). Se pueden utilizar dos vías para su obtención: la vía seca (Estados Unidos, Canadá, Reino Unido) y la vía húmeda (Francia). En ambos casos, el resultado es el mismo, obteniéndose el hexafluoruro de uranio casi puro, pero los efluentes son diferentes. En el primer caso se obtienen residuos en forma sólida, mientras que en el segundo aparecen en forma líquida.

La etapa del ciclo de combustible correspondiente a la **conversión** (la cual aplica para LWR y SMR) puede generar ciertos impactos al medio ambiente debido al consumo de los siguientes recursos y materias y, por otro lado, emisiones y residuos.

Tabla 9. Entradas y salidas en la fase de conversión.

RECURSOS y MATERIALES	ENERGÍA	EMISIONES Y RESIDUOS
Compuestos químicos orgánicos	Gas Natural	Residuos radiactivos
Agua tratada	Electricidad de Red	Gases de efecto invernadero
Fluoruro de Hidrogeno		Residuos no peligrosos
Compuestos químicos inorgánicos		Compuestos Orgánicos Volátiles No Metálicos
		Emisiones al aire como partículas

3.3.3. Enriquecimiento

Los Reactores de Agua Ligera exigen concentraciones del isótopo fértil U-235 en torno al 3 %, debiéndose enriquecer a partir de la proporción que tiene en la naturaleza que es del 0,72 %.

Todos los procesos considerados hasta la actualidad parten del UF₆ creado en la fase de conversión. Inicialmente, se experimentó con separación electromagnética, difusión térmica y difusión gaseosa, pero los dos primeros no resultaron adecuados desde el punto de vista de la producción industrial. Con posterioridad, se han desarrollado otros procesos de separación por centrifugación o por toberas, y últimamente se está experimentando con intercambio iónico y separación por láser.

Los métodos de difusión gaseosa, ultracentrifugación y separación por toberas son los que presentan un mayor interés industrial actualmente, por lo que se exponen a continuación.

- Difusión gaseosa: Hasta la década de los 90 del siglo pasado fue el método más utilizado. Se basa en la diferente velocidad de difusión, a través de una barrera porosa, de las moléculas de los dos isótopos de un mismo elemento, como consecuencia de su diferencia de masa. Se introduce UF₆ en una celda de difusión en la que el U-235 se difunde a través de la membrana más rápidamente que el U-238 (la Ley de Graham establece que, en determinadas condiciones, la velocidad de flujo de un gas a través de una membrana

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

porosa es inversamente proporcional a la raíz cuadrada del peso molecular). Es necesaria una difusión en cascada, con sucesivas pasadas, hasta obtener el enriquecimiento que sea requerido. La fracción enriquecida (la que atraviesa la membrana, pues la empobrecida sale por otro lado) se comprime mediante un compresor para bombearlo a la siguiente etapa, donde es necesario refrigerar el gas para extraer el calor generado durante dicha compresión, y donde se mezclará con la fracción empobrecida de la siguiente unidad de difusión. Este método requiere un alto consumo de energía eléctrica.

- Ultracentrifugación: Actualmente es el método más utilizado. Cuando se somete un gas a un centrifugado intenso y continuo, la fuerza centrífuga provoca que en la zona periférica se concentren las moléculas más pesadas, mientras que la fracción más ligera tiende a situarse en la zona próxima al eje de rotación. El mecanismo consta de un cilindro hueco que gira a gran velocidad, siendo el gas introducido por un extremo, y teniendo dos salidas en el otro extremo, por donde se separan la fracción pesada (periferia) de la ligera (centro). Para aumentar el efecto de separación se crea un gradiente térmico entre los dos extremos del cilindro, lo que induce un movimiento continuo del gas. Al igual que en el proceso de difusión gaseosa, se establece una cascada con varias unidades de centrifugación. Las posibilidades de este método están limitadas por la velocidad máxima impuesta por la resistencia mecánica del material de la centrifugadora y por el límite de longitud debido a la aparición de velocidades críticas.
- Separación por toberas: Se basa en la expansión de un chorro gaseoso supersónico, a la salida de una tobera, siendo las líneas de corriente de la fracción pesada menos desviadas que las líneas de la fracción ligera. La separación de las fracciones se hace mediante un diafragma que divide el grupo de líneas más curvadas y las menos curvadas. El chorro se hace incidir sobre una pared curvada para aumentar la curvatura de las líneas. También se establece un sistema en cascada al igual que en los métodos anteriores.

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

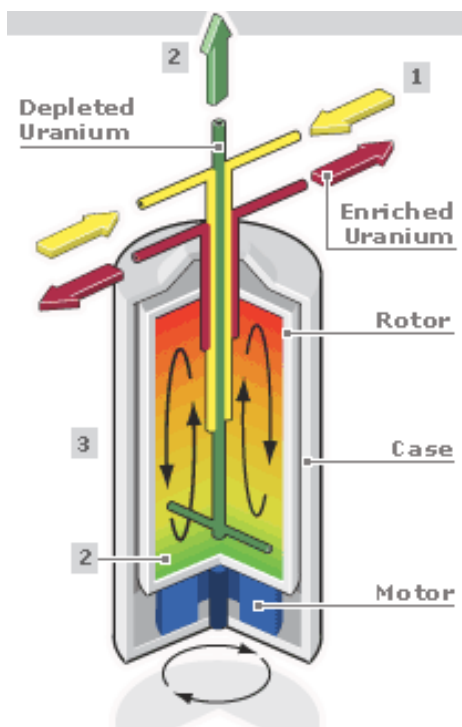


Figura 3-10. Esquema de enriquecimiento de uranio por centrifugación.

La etapa del enriquecimiento necesario para obtener el porcentaje de concentración necesarios para la fabricación de combustible, se identifican de manera general las siguientes entradas y salidas para dicho proceso:

Tabla 10. Entradas y salidas en la fase de enriquecimiento.

RECURSOS y MATERIALES	ENERGÍA	EMISIONES Y RESIDUOS
Transformación de la tierra	Electricidad de la red	Residuos no peligrosos
Agua tratada	Gas natural	Residuos de bajo nivel de radiactividad
Compuestos químicos		Agua
		Efluentes al agua como sólidos suspendidos, sulfatos, entre otros

3.3.4. Fabricación del combustible

Los Reactores de Agua Ligera utilizan el uranio en forma de óxido UO_2 debido a su mayor temperatura de fusión respecto al uranio metal, así como su mayor estabilidad térmica.

La fabricación de elementos combustibles incluye tres fases por:

- 1) Conversión química de hexafluoruro de uranio enriquecido en polvo de óxido UO_2 .
- 2) Fabricación de pastillas.
- 3) Fabricación y ensamblado de las barras de combustible.

Una característica importante de la fabricación de elementos combustibles es el control de calidad que va mucho más lejos que en otras industrias. Aquí todas las barras se controlan y no solamente algunas escogidas al azar. Los controles afectan a la estanqueidad de las vainas, dimensiones de las pastillas y vainas, y enriquecimiento de las barras.

El polvo de UO_2 se comprime a altas temperaturas ($1700\text{ }^{\circ}\text{C}$) bajo forma de pastillas de 10 mm de longitud y 10 mm de diámetro. En los Reactores de Agua Ligera las pastillas se introducen en vainas de *Zircaloy*, quedando un espacio para permitir la dilatación longitudinal en las barras así formadas, sellándose las vainas por soldadura de un tapón.

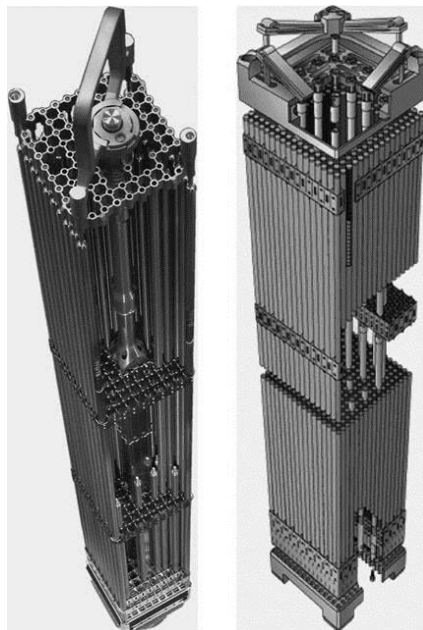


Figura 3-11. Elemento combustible de un reactor tipo PWR.

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

Los impactos correspondientes a la etapa de la **fabricación del combustible** pueden deberse a los siguientes factores:

Tabla 11. Entradas y salidas en la fase de fabricación del combustible.

RECURSOS y MATERIALES	ENERGÍA	EMISIONES Y RESIDUOS
Compuestos orgánicos	Electricidad de Red	Residuos peligrosos
Acero, aluminio, latón		Residuos no peligrosos
Cemento		Agua
Compuestos inorgánicos		Emisiones al aire como compuestos radiactivos, partículas, gases de efecto invernadero

3.3.5. Operación de la planta: quemado, recarga y almacenamiento en piscina

Los elementos combustibles se introducen en el núcleo del reactor nuclear donde tiene lugar lo que se conoce con el nombre de "quemado", proceso mediante el cual el uranio sufre la reacción de fisión en cadena, dando lugar, como resultado, a los productos de fisión y emitiendo una gran cantidad de energía en forma de calor, que se utiliza para producir energía eléctrica.



Figura 3-12. Núcleo del reactor.

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

En un elemento combustible nuclear tipo UO_2 comercial se pueden distinguir tres partes principales, el propio material combustible (dióxido de uranio - UO_2), las vainas de las barras combustibles (*Zircaloy*) y los materiales estructurales como tubos guía, cabezales y rejillas (aceros inoxidables e *Inconel*). Durante su permanencia en el núcleo del reactor el combustible nuclear se encontrará sometido a una elevada irradiación neutrónica. Este tiempo que el combustible nuclear es irradiado en el núcleo del reactor se denomina grado de quemado y su irradiación va a provocar una variación tanto estructural como en su composición química a lo largo del tiempo.

- En el combustible irradiado (matriz UO_2) aparecerán los denominados productos de fisión (PF), que son principalmente emisores beta y gamma. La radiactividad artificial del combustible gastado durante los primeros años de enfriamiento se debe principalmente a los productos de fisión, especialmente al estroncio (Sr-90) y cesio (Cs-137). Por captura neutrónica, parte del U-235 pasa a U-236 y parte del U-238 se transforma en elementos pesados, conocidos como elementos transuránicos como plutonio (Pu), neptunio (Np), americio (Am) y curio (Cm), caracterizados por ser, la mayor parte de ellos emisores alfa.
- A su vez, parte del plutonio generado (principalmente el Pu-239) se fisiona contribuyendo a la generación de energía y al inventario de los productos de fisión.
- En las vainas y en los materiales estructurales aparecen los denominados productos de activación, formados por reacciones de captura neutrónica por parte de algunos elementos constituyentes de los mismos. Los más representativos son el cobalto (Co-60), níquel (Ni-63), circonio (Zr-93) y niobio (Nb-94).

La aparición de U-236 y transuránicos, durante el periodo de irradiación, limitan el grado de quemado de un combustible a pesar de que todavía quede U-235 y plutonio fisionable en él, ya que dificultan la reacción en cadena porque capturan neutrones, son lo que se denomina venenos neutrónicos. Los elementos combustibles hay que retirarlos del núcleo del reactor y sustituirlos por otros nuevos en una operación que se llama recarga.

En una central nuclear, las actividades de recarga tienen como objetivo principal sustituir parte del combustible del reactor. Aproximadamente un tercio de los elementos combustibles irradiados se extrae del reactor en cada recarga y el resto de elementos se recolocan para maximizar su quemado y, por tanto, su aprovechamiento en los ciclos de operación posteriores. El combustible extraído se almacena en la piscina de combustible gastado de la central para su “enfriamiento” antes de su transporte a las instalaciones de almacenamiento correspondientes.

Una parada de recarga tiene una duración “nominal” de alrededor de 30 días. Una vez la recarga se ha llevado a cabo, la duración del siguiente ciclo de operación depende de las características

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

de cada central, aunque habitualmente es de 12, 18 ó 24 meses. Si la central operase a potencia reducida, o tuviese alguna incidencia que obligase a realizar una parada, esa circunstancia afectaría a la duración del ciclo de operación, que podría prolongarse.

La parada de recarga, se inicia con la parada y enfriamiento de la central, para posteriormente destapar la vasija del reactor y proceder a la recarga del combustible. A partir de ahí, se realizan los trabajos necesarios en los equipos o en los sistemas, que finalizan con las pruebas correspondientes, hasta llegar de nuevo al arranque de la central y sincronización a la red eléctrica, momento en que se considera finalizada la recarga correspondiente

La planificación de la recarga se realiza teniendo en cuenta que las actividades previstas se deben realizar garantizando la seguridad nuclear de la instalación y minimizando la dosis radiológica que recibirá el personal que interviene en la recarga, y asegurando la calidad de la ejecución de los trabajos a la vez que se optimiza su duración para cumplir los programas previstos.

Una vez concluido el ciclo de utilización de un elemento combustible en el reactor, éste se almacena temporalmente en la propia instalación, en la piscina de combustible irradiado. En este lugar permanece el tiempo necesario para que se produzca la desintegración de gran parte de los productos de fisión de corta vida. Este proceso de disminución de su actividad y, por tanto, del calor producido por la desintegración radiactiva se conoce como "enfriamiento".

Una vez descargado del reactor, los elementos de combustible nuclear gastado deben permanecer almacenados un mínimo de cinco años en piscinas de agua situadas en el mismo edificio que alberga el reactor. Cada uno de estos elementos combustibles se aloja en una de las celdas o bastidores dispuestos a modo de malla en el fondo de las piscinas. Las piscinas están construidas de hormigón armado y sus paredes están recubiertas de acero soldado y están diseñadas para evitar fugas y soportar eventos externos.

El agua de las piscinas cumple la función primordial de refrigerar el combustible nuclear gastado en las primeras etapas de su decaimiento radiactivo, mediante la extracción continua del calor residual generado por el combustible. Por otro lado, el agua de las piscinas es transparente y, además, constituye un buen blindaje biológico contra la radiación emitida por el combustible irradiado, características ambas que permiten la inspección y manejo seguro de estos elementos por parte de los trabajadores.

Tras la etapa inicial de enfriamiento en las piscinas de combustible irradiado, éste pierde parte de su radiactividad y su capacidad de generar calor residual, lo que permite su consideración como residuo y su posterior transporte y almacenamiento.

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

Finalizado el periodo de enfriamiento en piscinas, que dura unos cinco años aproximadamente, tiene lugar una fase intermedia de almacenamiento en seco del combustible gastado en almacenes ubicados en el propio emplazamiento de la central nuclear o en instalaciones de almacenamiento temporal durante decenas de años

A partir de aquí, el destino del combustible nuclear puede variar dependiendo de las políticas adoptadas por cada país. Llegados a este punto es necesario tener en cuenta que cuanto más tiempo se almacena el combustible, más fácil es de manejar. Esto se debe a que, con el tiempo, la actividad del combustible gastado irá decreciendo.

Tradicionalmente, se ha optado por almacenar el combustible gastado en instalaciones de almacenamiento definitivo. Cuando se selecciona esta solución, el escenario se conoce con el nombre de ciclo de combustible abierto.

Por otro lado, los avances técnicos y tecnológicos de los últimos años han permitido que el sector nuclear mundial contemple otra alternativa para la gestión del combustible gastado. Gracias a la técnica del reprocesado, es posible reutilizar parte del combustible gastado, reciclándolo y volviéndolo a introducir en el reactor para producir nuevas fisiones. Esta segunda opción para la gestión del combustible gastado se conoce con el nombre de ciclo de combustible cerrado.

Durante el **proceso de la operación de la planta** se identifican las siguientes entradas y salidas del proceso como posibles flujos que generen impactos a los diferentes niveles ambientales.

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

Tabla 12. Entradas y salidas en la fase de operación de la planta.

RECURSOS y MATERIALES	ENERGÍA	EMISIONES Y RESIDUOS
Agua de Refrigeración	Diesel para generadores	Residuos peligrosos (combustible gastado)
Dioxido de Carbono	Electricidad de la red	Residuos no peligrosos
Químicos Orgánicos		Agua
Aceites lubricantes		Efluentes gaseosos y líquidos de diferentes compuestos radiactivos

Es importante destacar en esta etapa del ciclo que la propia operación de la planta no genera emisiones de gases de efecto invernadero. Principal elemento diferenciador del resto de tecnologías de generación energética.

3.3.6. Almacenamiento del combustible nuclear: Ciclo Abierto

En la estrategia de ciclo abierto, el combustible nuclear irradiado se considera como residuo tal cual es, y no se aprovechan el uranio y el plutonio contenidos en él. Después de un periodo de enfriamiento variable en las instalaciones del productor o en almacenes centralizados, los elementos combustibles pueden ser encapsulados directamente o pueden ser desmantelados (en sentido mecánico), usando técnicas de manejo remoto, de manera que pueda reducirse el volumen antes de su encapsulado. Tras la fase de encapsulado, el combustible gastado se gestiona de forma permanente como residuo en almacenes definitivos. La opción más extendida es su almacenamiento en almacenes geológicos profundos que consisten en almacenes de residuos radiactivos de alta actividad situados a gran profundidad en el interior de formaciones geológicas estables.

Para situar los combustibles irradiados en el almacenamiento geológico profundo, es preciso encapsularlos en contenedores especiales resistentes a la corrosión, antes de proceder a su almacenamiento definitivo. Conviene destacar que no hay, por el momento, ningún sistema definitivo para este encapsulado, aunque si hay propuestas de sistemas que están desarrollándose en algunos países (Estados Unidos y Suecia, por ejemplo). Las investigaciones se dirigen fundamentalmente hacia la elección de materiales metálicos adecuados, con buenas

características de estabilidad frente a la corrosión, transmisión de calor, etc..., y que sean compatibles con el medio geológico elegido para el almacenamiento definitivo; en algún caso se plantea incluso el diseñar envolturas externas protectoras. El encapsulado se llevaría a cabo en “celdas calientes” dotadas de los equipos de transferencia, manejo y operación a distancia que el proceso requiere. El espacio vacío “combustible irradiado-cápsula” se podría rellenar con un material que depende del tipo de formación geológica en que vaya a situarse, y el conjunto se cerraría con una tapa soldada, haciéndolo estanco.

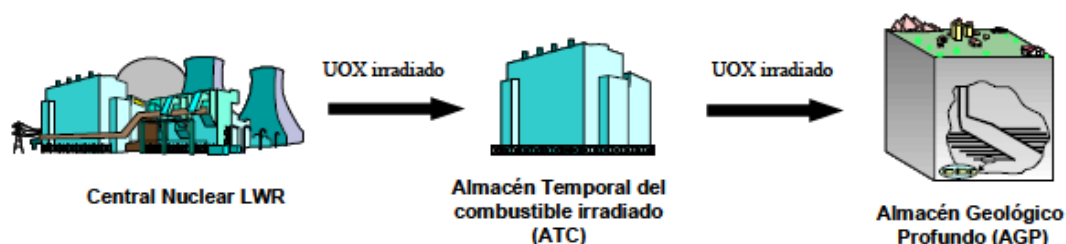


Figura 3-13. Esquema Ciclo Abierto.

3.3.7.Reprocesado del combustible nuclear: Ciclo Cerrado

El combustible gastado de los reactores tipo LWR, también denominado combustible irradiado, contiene uranio (96%), plutonio (1%) y productos de desecho de alta actividad (3%).

El 1% de dicho uranio es el isótopo fisionable U-235. Esta proporción de U-235 junto con el plutonio restante puede reutilizarse. Siguiendo esta línea, algunos países reprocesan químicamente el uranio y el plutonio para separarlos del resto de componentes del combustible que se consideran desechos inutilizables.

El plutonio recuperado, mezclado con uranio, se puede usar para fabricar nuevo combustible. Este combustible, conocido con las siglas MOX (*Mixed Oxide*), se trata de un combustible formado por de óxidos mixtos: óxido de uranio y óxido de plutonio. El plutonio contenido en el MOX presenta una proporción variable entre el 3% y el 10%.

Las únicas instalaciones comerciales de reelaboración para combustibles irradiados del tipo LWR que funcionan actualmente se encuentran en el Reino Unido (Sellafield), planta THORP; en Francia (La Hague), plantas UP2 y UP3; en Japón, planta de Rokkasho, en construcción desde 2006 actualmente sometida a test de prueba.

El tratamiento de los combustibles irradiados, también denominado reelaboración o reproceso, actualmente consiste en una secuencia de operaciones a las que se someten los combustibles irradiados con los siguientes objetivos:

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

- Recuperar el material físil del combustible gastado: separar U y Pu de todos los productos de fisión, activación y otros actínidos para la fabricación de nuevo combustible nuclear. Purificación del U y Pu.
- Reducir el volumen de los residuos a almacenar.
- Convertir todos los constituyentes radiactivos del combustible irradiado, excepto U y Pu, en formas sólidas adecuadas para su almacenamiento seguro a largo plazo.

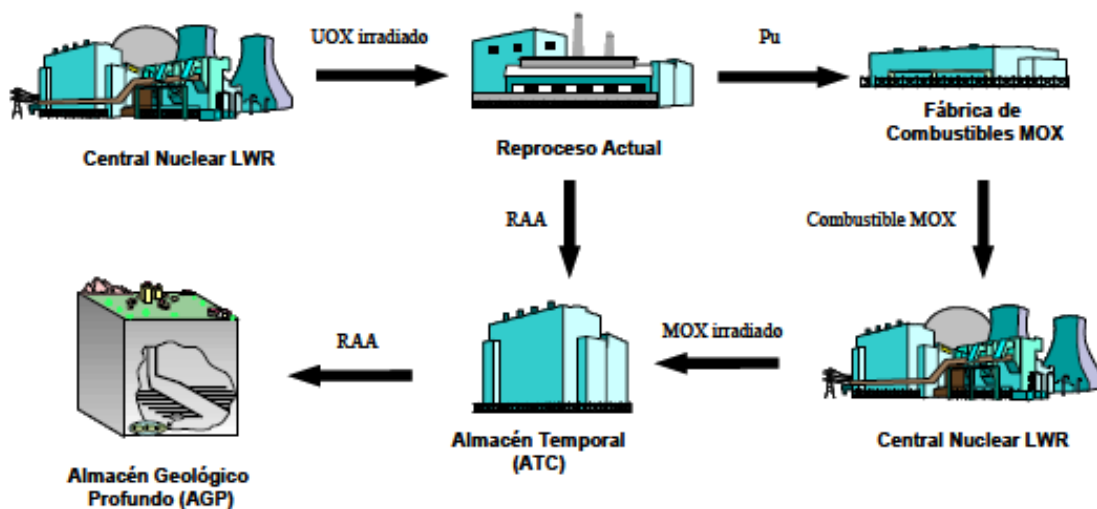


Figura 3-14. Esquema Ciclo Cerrado.

La reelaboración del combustible nuclear es fundamentalmente un proceso químico sujeto a una serie de características que no se dan en un proceso hidrometalúrgico convencional debido a la presencia de elementos muy radiactivos. Esto implica que las operaciones se realizan bajo un intenso campo de radiación y por tanto deben ser sometidas a un gran control y en recintos blindados para la protección del personal de las instalaciones de reelaboración.

La obtención de un producto final de gran pureza con recuperaciones mayores del 99% es también una característica importante de la reelaboración.

El denominado proceso PUREX (*Plutonium Uranium Redox EXtraction*) sobre el que se fundamenta la técnica de reprocesado está basado fundamentalmente en las siguientes etapas:

1) Troceado y disolución del combustible gastado (principalmente óxido de uranio, UO_2) en ácido nítrico, obteniéndose una mezcla líquida de nitrato de uranilo, nitrato de plutonio, nitratos de productos de fisión, nitratos de otros actínidos (Np, Am, Cm) y ácido nítrico libre.

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

2) Extracción selectiva del nitrato de plutonio y nitrato de uranilo por un éster de ácido fosfórico. Los productos principales resultantes de esta extracción son solubles en diluyentes orgánicos mientras que la mayor parte de los productos de fisión permanecen en la fase acuoso-nítrica, constituyendo los residuos líquidos de alta actividad.

3) Por medio de un reductor químico se separa el uranio del plutonio.

4) Mezclando la restante fase orgánica con agua ligeramente acidulada, el uranio pasa a la fase acuosa como nitrato de uranilo.

3.4. Tabla resumen de las entradas y salidas de cada proceso

A continuación, se adjunta una tabla resumen de las entradas y salidas más significativas identificadas para cada proceso en las tablas de cada uno de los apartados anteriores

Tabla 13. Tabla resumen de las entradas y salidas de cada proceso

		CONSTRUCCIÓN	OPERACIÓN	DESMANTELAMIENTO	PRODUCCIÓN DE AGUA PESADA	CONSTRUCCIÓN DE LA PLANTA DE AGUA PESADA	MINERÍA Y FABRICACIÓN DE CONCENTRADOS	CONVERSIÓN	ENRIQUECIMIENTO	FABRICACIÓN DEL COMBUSTIBLE
RECURSOS Y MATERIALES	Agua		x		x		x	x	x	
	Transformación de la tierra						x			
	Compuestos químicos orgánicos		x					x	x	x
	Compuestos químicos inorgánicos				x			x	x	
	Explosivos						x			
	Aceites lubricantes		x							
	Hormigón	x								x
	Acero de baja aleación	x				x				x
	Aluminio	x				x				x
	Otros elementos de construcción	x				x				
ENERGÍA	Electricidad	x	x	x	x	x		x		x
	Gas natural				x			x	x	
	Combustibles	x	x	x	x	x	x			
EMISIONES Y RESIDUOS	Emisiones al aire	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	Efluentes	x	x	x	x	x	x		x	x
	Residuos no peligrosos	x	x	x		x	x	x	x	x
	Residuos peligrosos		x				x	x		x

4. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

4.1. Metodología de Análisis de Ciclo de Vida

Una vez descritas las tecnologías nucleares de aplicación y el ciclo del combustible, de cara a describir y caracterizar las emisiones y descargas para cada una de las etapas se lleva a cabo el estudio del Análisis de Ciclo de Vida de cada una de ellas. Todas las entradas y salidas identificadas en cada una de las etapas del ciclo del combustible se van a transformar en impactos al medio mediante la metodología de ACV. A continuación, se describe esta metodología y los pasos necesarios para llevarla a cabo.

La creciente preocupación por la protección ambiental ha propiciado el desarrollo de metodologías que permiten cuantificar el daño provocado por la obtención de productos o servicios. De aquí surge el método del Análisis de Ciclo de Vida, cuyo enfoque pretende englobar los impactos ambientales de un producto o servicio de la manera más realista posible, es decir, teniendo en cuenta todos los procesos necesarios para la obtención de ese producto o servicio, desde la obtención de las materias primas y su manufactura hasta el tratamiento del producto una vez llegado al final de su vida útil. En línea con la intención de llevar a cabo un estudio lo más completo posible, la metodología de ACV evalúa diferentes categorías de impacto ambiental de modo que se puede obtener información del comportamiento ambiental del servicio o producto analizados a diferentes niveles de daño al medioambiente.

Una de las ventajas de realizar un análisis de comportamiento ambiental de un producto o servicio, teniendo en cuenta todo el ciclo de vida, es que permite identificar los procesos clave que generan la mayor parte de los impactos dentro del ciclo; además de poder tener una imagen mucho más completa del producto o servicio analizado.

Para estandarizar los estudios de ACV y permitir establecer comparativas entre ellos surgió la necesidad de crear normas estandarizadas y reconocidas. De aquí surge la familia ISO 14040 que define cuáles son los pasos necesarios para llevar a cabo un estudio de ACV. En la Figura 4-1 se describen los pasos requeridos para elaborar un ACV según la norma.

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

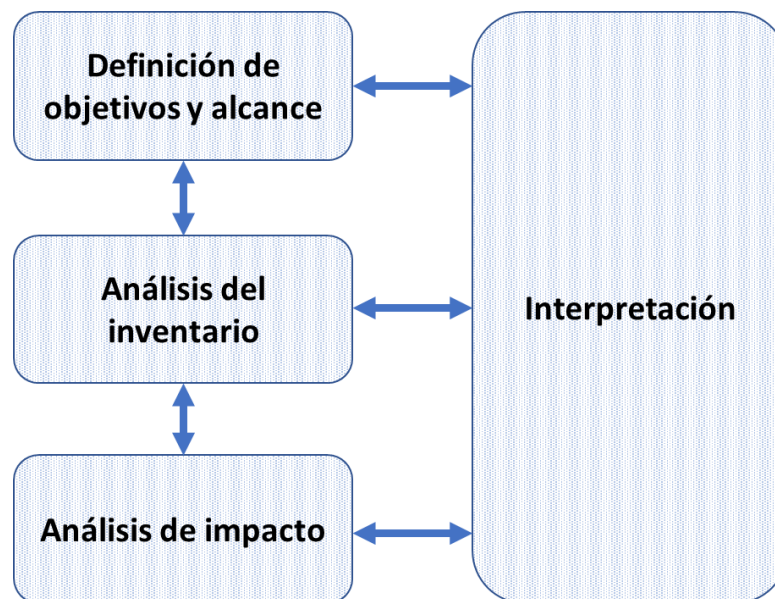


Figura 4-1. ISO 14040 ACV – fases del análisis

Las fases que se describen en la ISO 14040, son las siguientes:

I. Definición de objetivo y alcance

En la primera fase de **definición de objetivo y alcance** se define el producto o servicio sobre el que se va a llevar a cabo el estudio y se definen los alcances del mismo. Dentro del mismo es necesario definir previamente el enfoque del ACV.

Existen tres opciones posibles dentro del enfoque del ACV en función de las etapas del ciclo de vida que se contemplen. Es evidente que es recomendable llevar a cabo el estudio de ACV lo más completo posible, pero en ciertos casos puede que resulte despreciable o poco representativo calcular ciertas etapas. Estos enfoques se describen en la Figura 4-2.

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

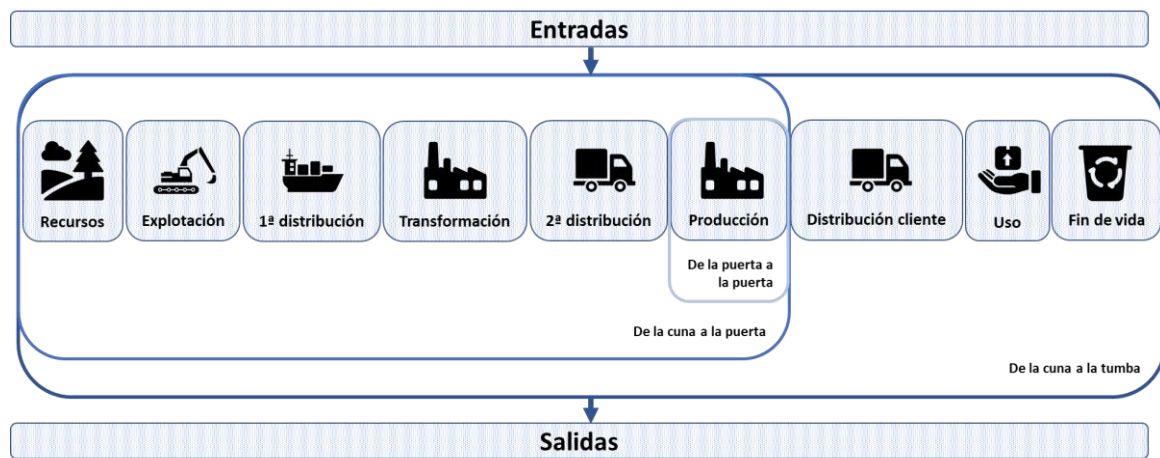


Figura 4-2. Enfoques de ACV

- **Enfoque de la puerta a la puerta** → son los impactos producidos durante la fase de control directo de la organización productora en cuestión.
- **Enfoque de la cuna a la puerta** → este enfoque considera las etapas desde la extracción y manufactura de las materias primas hasta que el producto, bien o servicio sale de la organización que lo produce. Este enfoque es interesante en los casos en los que resulte excesivamente costoso y poco enriquecedor el cálculo de las etapas posteriores.
- **Enfoque de la cuna a la tumba** → se trata de un ACV completo que engloba los pasos desde la extracción y manufactura de las materias primas hasta la gestión del residuo del producto o servicio.

En esta fase se define también la unidad funcional que viene a ser la unidad de referencia durante todo el estudio. Es la unidad respecto a la cual se presentan los resultados con intención de normalizarlos a una unidad comparable.

II. Análisis del inventario

Una vez definidos todos estos conceptos se procede a llevar a cabo la segunda fase definida por la ISO que se trata del **análisis del inventario** del ciclo de vida del producto o proceso escogido. En esta fase se procede a recoger toda la información necesaria para el cálculo de los impactos ambientales del ciclo de vida, como son materias primas, energía, residuos generados y vertidos. Para llevar a cabo una recopilación de datos lo más práctica posible, el ciclo de vida se divide en procesos unitarios de todas aquellas etapas que se hayan considerado que entran dentro del alcance definido.

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

El ciclo de vida se divide en una serie de procesos unitarios, como se describe en la Figura 4-3. Se analizan todos los flujos de entrada y salida para cada uno de estos pasos. Finalmente, se resumen todos ellos para brindar un panorama total del proceso.

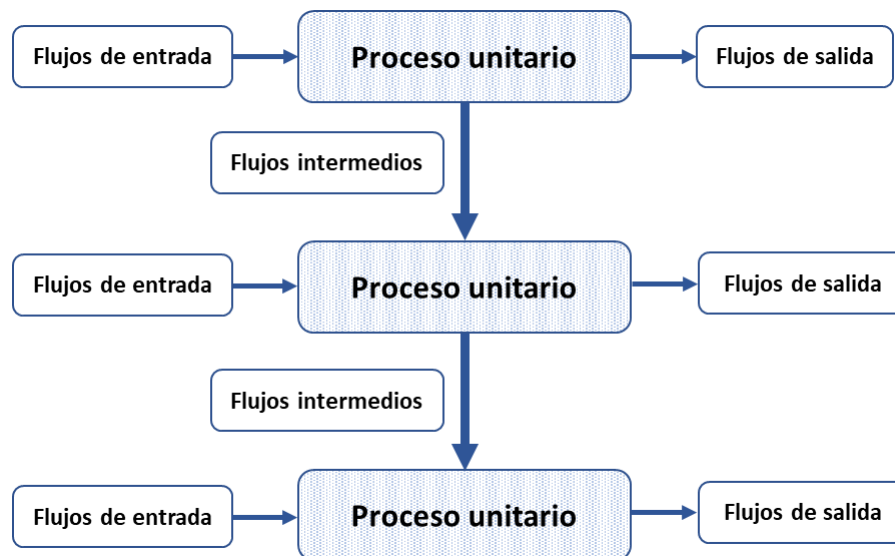


Figura 4-3. Ejemplo de los procesos unitarios que conforman el ACV

III. Análisis de impactos

La tercera fase contemplada en la ISO 14040 consiste en convertir esta información en daños al medio ambiente en forma de impactos ambientales. Tanto para la recogida de datos del inventario como para transformarlos en los impactos, existen metodologías, bases de datos y softwares que simplifican este proceso.

Las directrices fijadas por la norma permiten la elección del método de cálculo que mejor se adapte al estudio en cada caso siempre y cuando sean métodos verificados y reconocidos. De la misma manera, la elección de la base de datos para la recopilación del inventario también es de libre elección.

En la Tabla 14 se agrupan los aspectos escogidos para llevar a cabo el estudio: el software empleado es SimaPro®, la base de datos Ecoinvent® y la metodología de cálculo ReCiPe®.

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

Tabla 14. Selección de software, bases de datos y metodología de cálculo

Nombre		Descripción
Software		SimaPro® es una herramienta informática lanzada en 1990 y, desde entonces, ampliamente utilizada por empresas, consultoras, universidades y entre otros centros lo cual garantiza su potencial y buen funcionamiento.
Base de datos		Ecoinvent® es una base de datos con más de 10.000 entradas de datos de diferentes sectores como son la producción de energía, transporte, materiales de construcción, producción de químicos, entre otros. Contiene datos a nivel internacional
Metodología de cálculo		Se trata de una de las metodologías de cálculo más ampliamente utilizadas que evalúa 18 categorías de impacto.

La metodología de cálculo priorizada ha sido ReCiPe® la cual es una de las metodologías más empleadas en la actualidad. En la Figura 4-4, en la que se detalla la estructura de la metodología, se observa que lleva a cabo un primer proceso de caracterización en el que se obtienen categorías de impacto y un segundo paso de evaluación en el que se obtienen categorías de daño. El primer paso de obtención de las categorías de impacto es denominado por ReCiPe *midpoint* y el paso de la obtención de las categorías de daño lo denomina *endpoint*. Tras los resultados *endpoint* es posible llegar a una puntuación única mediante la agrupación de los resultados (esto se observa en la Figura 4-4).

El proceso que lleva a cabo el método para el cálculo de todos los valores hasta la puntuación final es detallado en el sitio web de *Netherlands National Institute for Public Health and the Environment, Ministry of Health, Welfare and Sport* [18]. En este sitio es posible acceder a los últimos informes actualizados y publicados acerca del método y otros datos de utilidad.

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

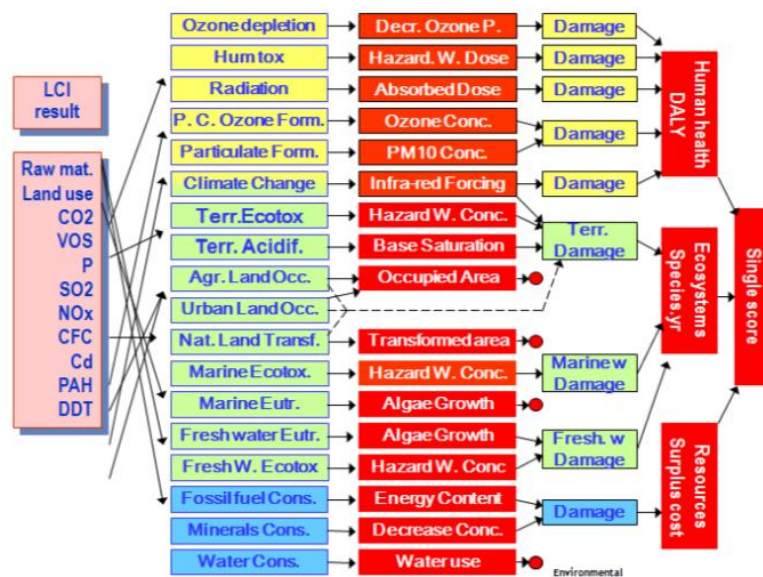


Figura 4-4. Estructura de la metodología ReCiPe®

El paso de caracterización es un paso de obligado cálculo según la ISO 14040. A partir del paso de caracterización se considera opcional continuar con el cálculo hasta su agrupamiento en la puntuación única.

Las **categorías de impacto midpoint** son una serie de categorías que traducen las emisiones y consumos del medio en los principales impactos ambientales como son el cambio climático, la destrucción de la capa de ozono, entre otras. Mientras que las **categorías de daño** lo que hacen es reagrupar estas categorías de impacto en tres grandes grupos (categorías de daño) que reflejan el daño a la salud humana, a los ecosistemas y a la disminución de recursos.

CATEGORÍAS DE IMPACTO MIDPOINT - CARACTERIZACIÓN

Las categorías de impacto *midpoint* evaluadas por la metodología ReCiPe® se describen a continuación:

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

Tabla 15. Descripción de categorías de impacto del método ReCiPe®

Categoría de impacto		Descripción	Unidades
1	Destrucción de la capa de ozono (<i>Ozone Depletion</i>)	Categoría que corresponde a la degradación del ozono estratosférico debida a las emisiones de sustancias que agotan la capa de ozono.	kg CFC-11 equivalentes
2	Toxicidad humana (<i>Human toxicity</i>)	Contabiliza la acumulación en la cadena alimentaria humana (exposición) y toxicidad (efecto) de un químico.	kg 1,4-diclorobenceno equivalente
3	Radiación (<i>Radiation</i>)	El factor de caracterización de la categoría radiación mide el nivel de exposición.	kg de ²³⁵ U equivalente
4	Formación fotoquímica de ozono (<i>Photochemical ozone formation</i>)	Esta categoría se define como el cambio sufrido por la concentración media de ozono (dCO_3 en $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) debido a un cambio en la emisión de sustancias (dMx en $\text{kg}\cdot\text{year}^{-1}$)	kg NMVOC ⁴ equivalentes
5	Formación de partículas (<i>Particulate matter formation</i>)	Contabiliza la concentración de partículas de tipo PM ₁₀ detectadas.	kg de PM ₁₀ equivalentes
6	Cambio climático (<i>Climate change</i>)	El factor de caracterización de esta categoría es el potencial de cambio climático.	kg de CO ₂ equivalentes
7	Ecotoxicidad terrestre (<i>Terrestrial ecotoxicity</i>)	Esta categoría contempla la persistencia medioambiental de una sustancia química en el suelo.	kg de 1,4-diclorobenceno equivalentes
8	Acidificación terrestre (<i>Terrestrial acidification</i>)	Esta categoría contabiliza la acidificación de los suelos.	kg de SO ₂ equivalentes
9	Ocupación de terreno agrícola (<i>Agricultural land Occupation</i>)	Contabiliza el área de terreno agrícola ocupado durante un periodo determinado de tiempo.	año·m ²
10	Ocupación del terreno urbano (<i>Urban land occupation</i>)	Contabiliza el área de terreno urbano ocupado durante un periodo determinado de tiempo.	año·m ²
11	Transformación de terreno agrícola (<i>Natural land transformation</i>)	Contabiliza el área de terreno natural ocupado y transformado durante un periodo determinado de tiempo.	año·m ²

⁴ Compuestos orgánicos volátiles sin metano (por sus siglas en inglés)

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

Categoría de impacto		Descripción	Unidades
12	Ecotoxicidad marina (<i>Marine ecotoxicity</i>)	Esta categoría contempla la persistencia medioambiental de una sustancia química en el medio marino.	kg de 1,4-diclorobenceno equivalentes
13	Eutrofización marina (<i>Marine eutrophication</i>)	El factor de caracterización de la categoría de eutrofización marina mide la persistencia medioambiental de la emisión de sustancias nutrientes con N en su composición.	kg de N liberado en agua equivalentes
14	Eutrofización de agua (<i>Freshwater eutrophication</i>)	El factor de caracterización de la categoría de eutrofización marina mide la persistencia medioambiental de la emisión de sustancias nutrientes con P en su composición.	kg de P liberado en agua equivalentes
15	Ecotoxicidad del agua (<i>Freshwater ecotoxicity</i>)	Esta categoría contempla la persistencia medioambiental de una sustancia química en agua dulce.	kg de 1,4-diclorobenceno equivalentes
16	Disminución de recursos fósiles (<i>Fossil fuel consumption</i>)	El factor de caracterización de la categoría de disminución de combustibles fósiles está basado en la cantidad extraída de combustibles.	kg de petróleo equivalentes
17	Disminución de recursos minerales (<i>Minerals consumption</i>)	La categoría disminución de recursos minerales mide la disminución en grado de dichos recursos.	kg de Fe equivalentes
18	Disminución de recursos hídricos (<i>Water consumption</i>)	Esta categoría contabiliza la disminución de los recursos hídricos por su consumo.	m ³

El software SimaPro® traduce las entradas y salidas del inventario del Análisis de Ciclo de Vida en las diferentes categorías de impacto *midpoint*. Para transformar los datos que conforman el inventario en categorías de impacto son necesarios los factores de caracterización, que son únicos para cada categoría. En este paso se transforma cada dato del inventario en una contribución a cada categoría de impacto.

En la Figura 4-5, se muestra un ejemplo de los factores que se emplean para transformar los consumos de recursos y demás datos de los inventarios en contribuciones a las diferentes categorías de impacto.

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

General Caracterización Normalización							
Categoría de impacto	Ud.	Compartimento	Subcompartimento	Sustancia	Número CAS	Factor	Ud.
Climate change	kg CO ₂ eq	Aire		1-Butanol	000071-36-3	1,05	kg NMVOC / kg
Ozone depletion	kg CFC-11 eq	Aire		1-Butene	000106-68-9	1,82	kg NMVOC / kg
Terrestrial acidification	kg SO ₂ eq	Aire		1-Butene, 2-methyl-	000563-46-2	1,3	kg NMVOC / kg
Freshwater eutrophication	kg P eq	Aire		1-Butene, 3-methyl-	000563-45-1	1,13	kg NMVOC / kg
Marine eutrophication	kg N eq	Aire		1-Hexene	000592-41-6	1,48	kg NMVOC / kg
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	Aire		1-Pentene	000109-67-1	1,65	kg NMVOC / kg
Photochemical oxidant formation	kg NMVOC	Aire		1-Propanol	000071-23-8	0,948	kg NMVOC / kg
Particulate matter formation	kg PM ₁₀ eq	Aire		2-Butanol	000078-92-2	0,676	kg NMVOC / kg
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	Aire		2-Butanone, 3-methyl-	000563-80-4	0,615	kg NMVOC / kg
Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	Aire		2-Butene (cis)	000590-18-1	1,94	kg NMVOC / kg
Marine ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	Aire		2-Butene (trans)	000624-64-6	1,91	kg NMVOC / kg
Ionising radiation	kBq U235 eq	Aire		2-Butene, 2-methyl-	000513-35-9	1,42	kg NMVOC / kg
Agricultural land occupation	m ² a	Aire		2-Hexanone	000591-78-6	0,966	kg NMVOC / kg
Urban land occupation	m ² a	Aire		2-Hexene (cis)	007688-21-3	1,81	kg NMVOC / kg
Natural land transformation	m ²	Aire		2-Hexene (trans)	004050-45-7	1,81	kg NMVOC / kg
Water depletion	m ³	Aire		2-Methyl-1-propanol	000078-83-1	0,608	kg NMVOC / kg
Metal depletion	kg Fe eq	Aire		2-Methyl-2-butanol	000075-85-4	0,385	kg NMVOC / kg
Fossil depletion	kg oil eq	Aire		2-Pentanone	000107-87-9	0,926	kg NMVOC / kg
		Aire		2-Pentene (cis)	000627-20-3	1,89	kg NMVOC / kg
		Aire		2-Pentene (trans)	000646-04-8	1,89	kg NMVOC / kg
		Aire		2-Propanol	000067-63-0	0,318	kg NMVOC / kg
		Aire		3-Hexanone	000589-38-8	1,01	kg NMVOC / kg
		Aire		3-Methyl-1-butanol	000123-51-3	0,731	kg NMVOC / kg
		Aire		3-Pentanol	000584-02-1	1,01	kg NMVOC / kg
		Aire		3-Pentanone	000096-22-0	0,699	kg NMVOC / kg
		Aire		3,3-Dimethyl-2-butanone	000075-97-8	0,546	kg NMVOC / kg
		Aire		4-Hydroxy-4-methyl-2-pentanone	000123-42-2	0,519	kg NMVOC / kg
		Aire		4-Methyl-2-pentanone	000108-10-1	0,828	kg NMVOC / kg
		Aire		Acetaldehyde	000075-07-0	1,08	kg NMVOC / kg
		Aire		Acetic acid	000064-19-7	0,164	kg NMVOC / kg
		Aire		Acetone	000067-64-1	0,159	kg NMVOC / kg
		Aire		Aldehydes, unspecified		0,927	kg NMVOC / kg
		Aire		Benzaldehyde	000100-52-7	-0,155	kg NMVOC / kg
		Aire		Benzene	000071-43-2	0,368	kg NMVOC / kg
		Aire		Benzene, 1,2,3-trimethyl-	000526-73-8	2,14	kg NMVOC / kg
		Aire		Benzene, 1,2,4-trimethyl-	000095-63-6	2,16	kg NMVOC / kg
		Aire		Benzene, 1,3,5-trimethyl-	000108-67-8	2,33	kg NMVOC / kg
		Aire		Benzene, 3,5-dimethylethyl-	000934-74-7	2,23	kg NMVOC / kg
		Aire		Benzene, ethyl-	000100-41-4	1,23	kg NMVOC / kg
		Aire		Butadiene	000106-99-0	1,44	kg NMVOC / kg
		Aire		Butanal	000123-72-8	1,34	kg NMVOC / kg
		Aire		Butane	000106-97-8	0,595	kg NMVOC / kg
		Aire		Butane, 2,2-dimethyl-	000075-83-2	0,407	kg NMVOC / kg
		Aire		Butane, 2,3-dimethyl-	000079-29-8	0,914	kg NMVOC / kg
		Aire		Butanol, 2-methyl-1-	000137-32-6	0,626	kg NMVOC / kg
		Aire		Butanol, 3-methyl-2-	000588-75-4	0,686	kg NMVOC / kg
		Aire		Butyl acetate	000123-86-4	0,454	kg NMVOC / kg
		Aire		Carbon monoxide	000630-08-0	0,0456	kg NMVOC / kg
		Aire		Carbon monoxide, biogenic	000630-08-0	0,0456	kg NMVOC / kg
		Aire		Carbon monoxide, fossil	000630-08-0	0,0456	kg NMVOC / kg
		Aire		Chloroform	000067-66-3	0,0389	kg NMVOC / kg
Buscar texto				Items	137		
				Total items	129.566		

Figura 4-5. Pantallazo de la interfaz de SimaPro®, factores de caracterización para la categoría de formación de oxidantes fotoquímicos

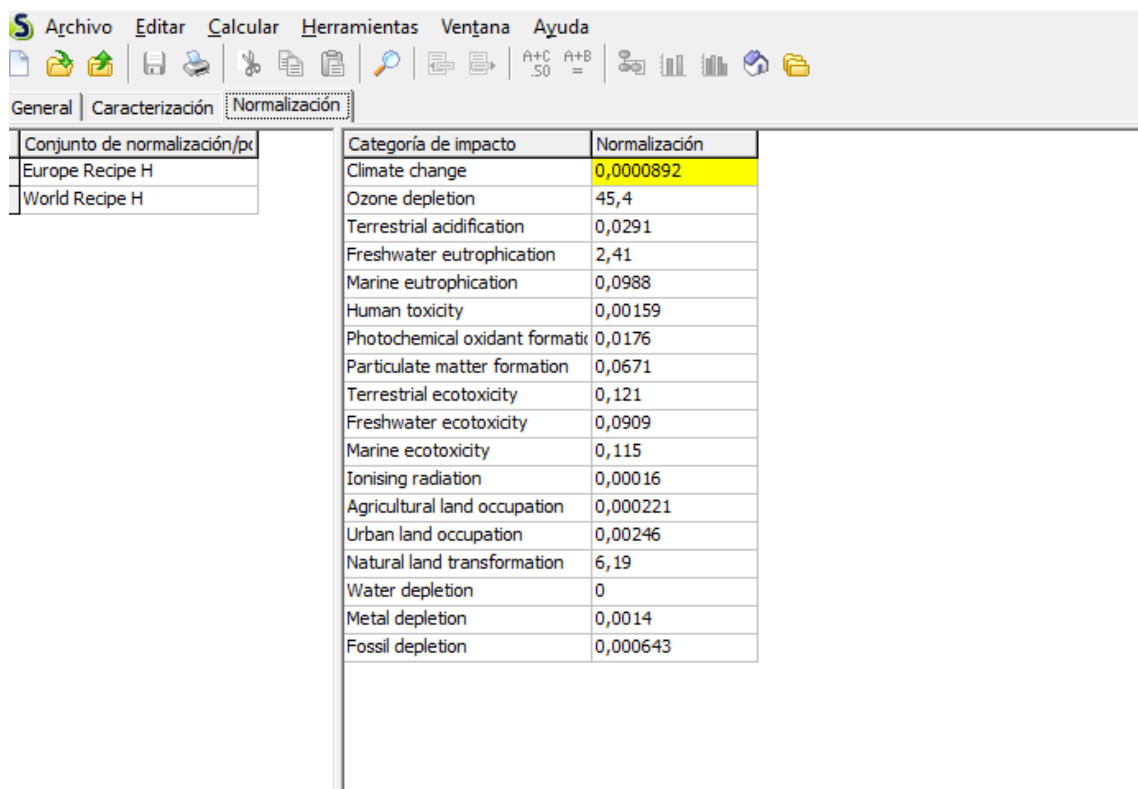
El paso de la transformación de los datos del inventario en contribuciones a las categorías de impacto se denomina caracterización.

Dado que las categorías de impacto presentan diferentes unidades entre sí y cada una definen una contribución a problemáticas ambientales diferentes, no resultaría lógico comparar los resultados de la caracterización entre sí, es por esto que existen factores de normalización.

Los factores de normalización consisten en factores que hacen que cada categoría de impacto se normalice frente a un valor de referencia otorgándole el grado de contribución en un lugar y momento determinados. Por ejemplo, si 1 litro de leche tiene un impacto de 1 kg de CO₂eq y las emisiones totales en una región determinada son de 7 ton de CO₂eq/persona, dividiendo 1/7000 se obtiene el factor por personas/año*litro. Si se sabe que una persona consume 50 litros de leche al año se puede conocer el potencial anual de cambio climático provocado por una persona. Este ejemplo constituye el tipo de cálculos que el equipo de expertos desarrolladores de la metodología ReCiPe han llevado a cabo para la obtención de los factores de normalización para calcular la

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

contribución de cada categoría de impacto a cada problemática ambiental. Los factores de normalización se detallan en la Figura 4-6.



Conjunto de normalización/pc	Categoría de impacto	Normalización
Europe Recipe H	Climate change	0,0000892
World Recipe H	Ozone depletion	45,4
	Terrestrial acidification	0,0291
	Freshwater eutrophication	2,41
	Marine eutrophication	0,0988
	Human toxicity	0,00159
	Photochemical oxidant formation	0,0176
	Particulate matter formation	0,0671
	Terrestrial ecotoxicity	0,121
	Freshwater ecotoxicity	0,0909
	Marine ecotoxicity	0,115
	Ionising radiation	0,00016
	Agricultural land occupation	0,000221
	Urban land occupation	0,00246
	Natural land transformation	6,19
	Water depletion	0
	Metal depletion	0,0014
	Fossil depletion	0,000643

Figura 4-6. Factores de normalización para las categorías de impacto

CATEGORÍAS DE DAÑO *ENDPOINT* - EVALUACIÓN

Como se ha mencionado, la norma ISO de aplicación considera de obligado cálculo hasta la caracterización, es decir, hasta la obtención de las categorías de impacto *midpoint*. Posteriormente, esta información puede agruparse en tres categorías de daño *endpoint* que son: daño a la salud humana, daño a los ecosistemas y disminución de recursos que, a su vez, pueden agruparse para obtener una puntuación única, normalizada y ponderada en Puntos (Pt). Este último proceso se denomina evaluación (evaluación del daño, Figura 4-7).

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

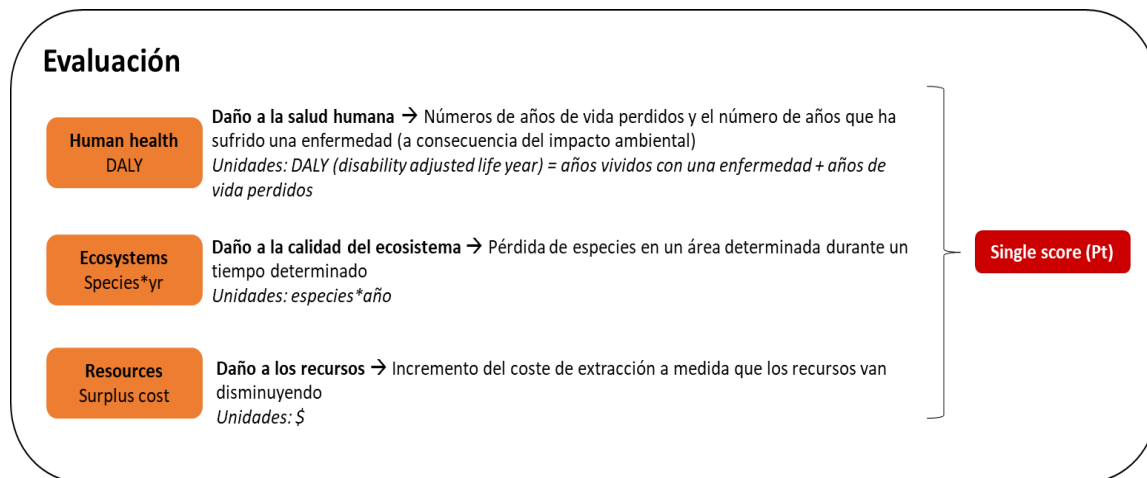


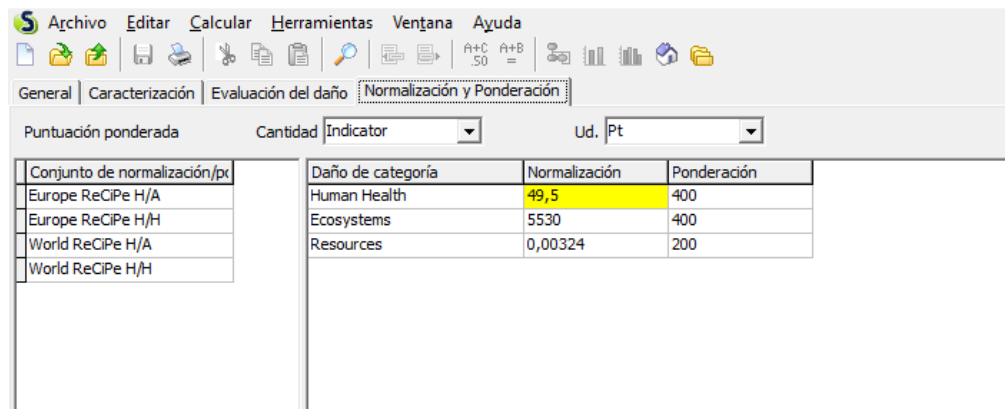
Figura 4-7. Categorías de daño endpoint según ReCiPe®

De la misma manera que se han obtenido en el primer paso las categorías de impacto *midpoint* a través de factores de caracterización para cada una, en el paso de evaluación del daño, los datos del inventario se multiplican por unos factores de caracterización que los transforman en las tres categorías de daño en las unidades correspondientes: DALY, especies*año y \$.

De nuevo, las tres categorías de daño presentan diferentes unidades y constituyen conceptos diferentes de modo que a la hora de ser comparables entre sí también deben ser normalizados (del mismo modo que sucede con las categorías de impacto). Los factores de normalización se detallan en la Figura 4-8.

Los valores de ponderación que presenta el método provienen de estudios y análisis llevados a cabo por los desarrolladores del método y presentan cierto grado de subjetividad ya que evalúan criterios socioeconómicos, valores sociales, valores de expertos ambientales, entre otros. El conjunto de todos estos criterios ofrece unos valores que otorgan un peso relativo a cada categoría de daño entre sí, de modo que, al sumarlas para obtener la puntuación única, se obtiene un valor que representa la contribución de cada una (Figura 4-8).

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.



Daño de categoría	Normalización	Ponderación
Human Health	49,5	400
Ecosystems	5530	400
Resources	0,00324	200

Figura 4-8. Factores de normalización y ponderación *endpoint*

IV. Interpretación de los resultados

La última fase especificada por la ISO es la **interpretación de los resultados** obtenidos en la cual se resumen y discuten los resultados obtenidos del análisis de cara a establecer unas conclusiones del mismo.

4.2. Recopilación del inventario

Para poder identificar las principales emisiones y descargas de la producción de energía mediante tecnologías de generación nuclear se ha recopilado el inventario con la ayuda de la base de datos Ecoinvent® además de datos proporcionados por otras fuentes bibliográficas.

En línea con la “Propuesta y Desarrollo de una metodología de evaluación de tecnologías del sector energía, basada en un enfoque de ciclo de vida” enmarcada en el desarrollo de la política Energía 2050 de Chile, se han llevado a cabo una serie de priorizaciones en la selección de la información en la base de datos Ecoinvent®. Estas priorizaciones se basan en llevar a cabo un estudio lo más adaptado posible al territorio chileno, de modo que se ha procurado disminuir el sesgo priorizando información existente en la base de datos correspondiente a Chile, luego países latinoamericanos, preferentemente México o Brasil y, por último, información catalogada en la base de datos como “RoW” (*Rest of the World*, por sus siglas en inglés). Esta priorización por regiones hace que los datos, que difieren entre regiones, como la matriz energética o la disponibilidad de agua del medio se ajusten al territorio. En línea con esto, se ha actualizado la proporción de las tecnologías que conforman la matriz al año 2016 (ya que la última actualización de esta matriz en Ecoinvent® es

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

de 2014) tomando los datos del Anuario Estadístico de Energía de 2016 de la Comisión Nacional de Energía [19].

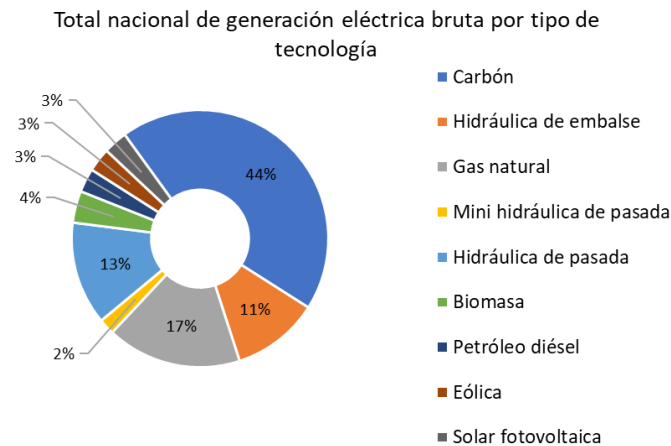


Figura 4-9. Total nacional de generación eléctrica bruta por tipo de tecnología

Siempre y cuando se tome consumo de electricidad como una entrada a alguna de las etapas del ciclo del combustible se tomará esta matriz.

La unidad funcional de los ACV llevados a cabo será 1 kWh de energía producido por cada tipo de tecnología de generación de electricidad. Todos los datos y resultados se han escalado de acuerdo con esta unidad funcional con el objetivo de que sean comparables entre ellos.

De cara a llevar a cabo el análisis de ciclo de vida respecto a la unidad funcional, que en este caso se ha propuesto 1kWh, todos los datos de entrada y salida deben estar normalizados a dicha unidad. Se entiende que existe una linealidad en los datos por lo que, conociendo las entradas y salidas escaladas a nivel anual o para una generación determinada de energía, es posible extrapolar estas entradas y salidas a 1 kWh.

Todos los procesos tenidos en cuenta deben estar escalados a esta unidad funcional, desde la construcción de la planta hasta el desmantelamiento de esta, pasando por los procesos de operación y todo el ciclo del combustible.

Los datos necesarios para simular cada etapa del ciclo de combustible para 1kWh se han extraído de diversas fuentes. Es decir, las cantidades de uranio necesarias desde la extracción minera hasta la fabricación de combustible para la obtención final de 1kWh (Anexo III).

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

El escalado de las fases de construcción y desmantelamiento se han llevado a cabo partiendo de la producción anual de energía por dicha planta y para cuántos años está prevista. Con estos datos, es posible escalar las entradas y salidas de la construcción y desmantelamiento para 1 kWh.

Se entiende que existe una linealidad entre los datos requeridos de entrada y salida con la energía generada, es decir, a mayor cantidad de energía generada mayor cantidad de entradas al sistema y salidas habrá.

Los datos del inventario con las cantidades de cada entrada y salida se agrupan en tablas en el Anexo II.

A continuación, se detalla qué aproximaciones e hipótesis se han tenido en cuenta a la hora de elaborar los inventarios de las distintas tecnologías y ciclos de combustible.

4.2.1.LWR (PWR)

Como se muestra en la Figura 3-2 el reactor más extendido a nivel global en el panorama nuclear es PWR por lo tanto, es el tipo de reactor escogido para llevar a cabo el estudio.

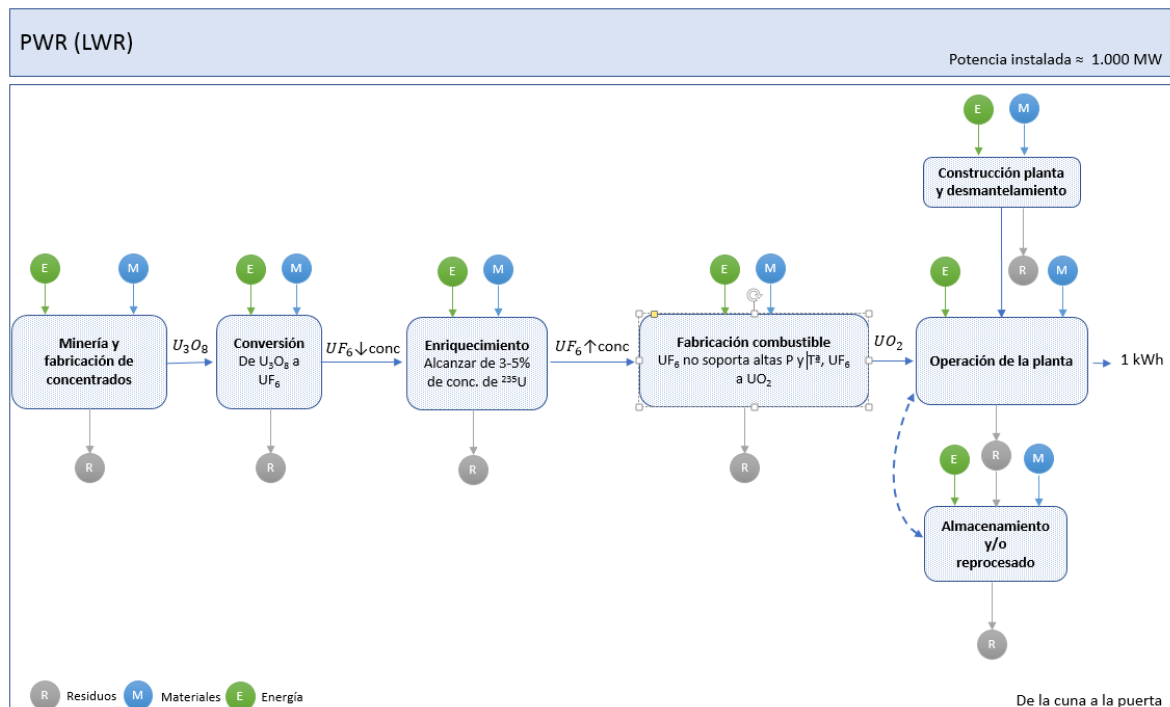


Figura 4-10. Esquema del ciclo de vida de LWR

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

Con la intención de llevar a cabo un estudio de una tecnología desarrollada que se ajuste a las necesidades futuras del país, se ha tomado como referencia una planta tipo AP1000 para la tecnología de PWR [20]. Este tipo de reactor incluye algunas de las características básicas de un PWR de generación anterior como los que operan a día de hoy y además incluye los últimos avances de diseño del AP1000.

A. Minería y fabricación de concentrados

Los datos del inventario del proceso de minería y fabricación de concentrados para la obtención del uranio a partir del mineral se han considerado dos de los procesos de extracción que suponen alrededor de la mitad de las extracciones mundiales de uranio [21]. Dichos procesos de extracción de uranio son la minería subterránea y la minería a cielo abierto. Por lo tanto, para simular este paso se han considerado que las extracciones se hacen 50% y 50% respectivamente, estableciendo así un escenario probable.

En este proceso se incluyen también los impactos correspondientes a la obtención de los concentrados para obtener el óxido de uranio concentrado o “yellow cake” (U_3O_8).

B. Conversión

En este paso se ha contabilizado el proceso de transformar el óxido de uranio concentrado en hexafluoruro de uranio (UF_6) para posteriormente ser enriquecido.

C. Fabricación combustible

En el proceso de Fabricación de Combustible se incluyen por un lado el proceso de enriquecimiento del Uranio y por otro, el propio proceso de fabricación del combustible.

Tal y como se ha explicado en el apartado 3.3.4, el uranio se encuentra en la naturaleza en forma de mineral, con una concentración en el isótopo fisionable U-235 del 0,7%. La mayoría de los reactores necesitan una concentración de U-235 superior a la que existe en su estado natural, por eso es necesario someterlo a un enriquecimiento hasta alcanzar concentraciones de U-235 mayores de manera que permita generar reacciones nucleares en cadena controladas [22].

Dado que aún no hay definiciones de ninguna tecnología en particular y, que tal y como se ha mencionado, pueden existir diferentes porcentajes de enriquecimiento, se considera que no es acertado tomar un único porcentaje de enriquecimiento de combustible sin asumir cierto error.

Por ello, el análisis de esta etapa se ha llevado a cabo considerando los porcentajes de 3,8%, 3,9%, 4,0% y 4,2% de enriquecimiento en UO_2 .

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

Por otro lado, los procesos de enriquecimiento se han simulado mediante el método de centrifugado ya que el proceso de difusión gaseosa se encuentra actualmente obsoleto [23].

D. Operación de la planta

En este paso se ha incluido la información correspondiente a los procesos de operación de la planta para la generación de 1 kWh de energía. Dentro de este proceso se contabilizan los residuos radiactivos generados durante la operación de la planta, tanto los de nivel de radiactividad bajo e intermedio como los de alto nivel de radiactividad.

E. Construcción y desmantelamiento de la planta

En este indicador se contabilizan los datos del inventario de la construcción y del desmantelamiento de una planta completa de tipo PWR. Dentro de este proceso se incluyen los impactos y residuos generados por el procesamiento de los residuos no radiactivos. Los residuos radiactivos generados se contabilizan en el proceso de operación de la planta (ver apartado D).

F. Construcción de almacenamientos intermedios y finales de residuos

Los tratamientos de los residuos generados se incluyen en la etapa de operación de la planta, sin embargo, los datos del inventario para la construcción de los depósitos se incluyen en este apartado. Se han considerado construcciones para el almacenamiento intermedio y final de los residuos de alto nivel de radiactividad y bajo nivel de radiactividad.

Una vez descritas las etapas comunes para el ACV de PWR se procede a detallar los elementos diferenciadores entre ciclo abierto y cerrado. En este caso dichos elementos serán la composición del combustible, la gestión de los residuos y la construcción de los depósitos para los residuos. En los dos apartados siguientes se describen estas diferencias.

4.2.1.1. Ciclo abierto

Para ciclo abierto, en el apartado de la fabricación del combustible, se considera un combustible con 0% de combustible reprocesado (MOX) en su composición. En el caso de la construcción de los almacenamientos intermedios y finales para los residuos, en ciclo abierto se incluyen tanto para residuos radiactivos de alto nivel de radiactividad y para residuos de bajo nivel de radiactividad.

4.2.1.2. Ciclo cerrado

Se ha considerado un proceso de fabricación del combustible con un 30% reprocesado (MOX) además de la cantidad correspondiente de combustible primario. Debido a esta cantidad de combustible reprocesado, el combustible primario o “virgen”, para la misma generación energética,

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

es menor que para ciclo abierto [24]. La construcción del almacenamiento de los residuos de alto nivel de radiactividad no se va a contabilizar, ya que se considera que se va a reprocesar. Sin embargo, la gestión de los residuos de bajo nivel de radiactividad se mantiene, ya que se entiende que se van a generar igualmente y no son elementos aprovechables como combustible reprocesado.

4.2.2.SMR

Dada la gran variedad de tecnologías de generación que existen bajo las características de las plantas SMR se ha especificado que, en este caso, se va a simular como una iPWR SMR (*Integral Pressurized Water Reactor*) [20].

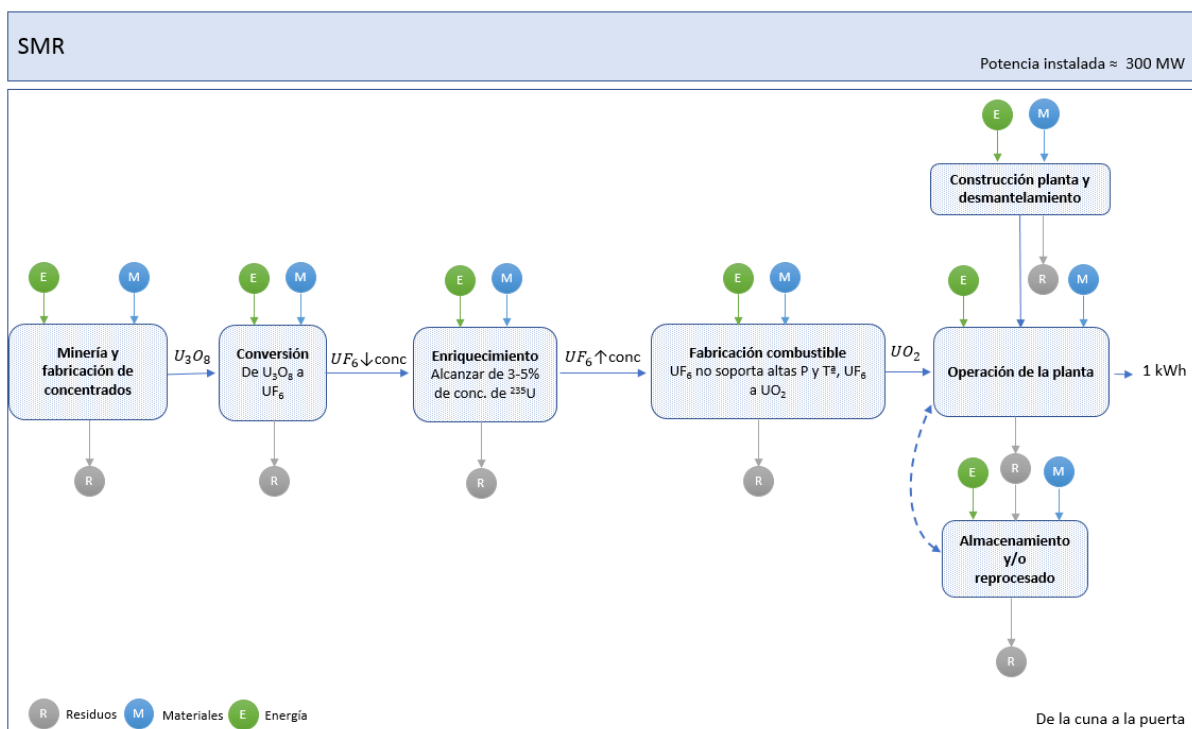


Figura 4-11. Esquema del ciclo de vida de SMR

A. Minería y fabricación de concentrados

La etapa de minería y fabricación de concentrados hasta la obtención de óxido de uranio concentrado o “yellow cake” (U_3O_8) se ha simulado de la misma manera que para LWR, considerando los dos tipos de minería más comunes actualmente, a cielo abierto y subterráneas, en un porcentaje de 50% cada una.

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

Dentro de este apartado se incluye también el proceso de la transformación de los productos minerales en U_3O_8 .

B. Conversión

El proceso de obtención de UF_6 a partir de U_3O_8 antes de ser enriquecido, se ha llevado a cabo de la misma manera que para PWR.

C. Fabricación combustible

El enriquecimiento y la obtención del combustible se ha simulado en esta etapa y se han considerado los mismos porcentajes de enriquecimiento que para PWR: 3,8%, 3,9%, 4,0% y 4,2%.

D. Operación de la planta

La principal diferencia entre una planta tipo PWR y una SMR es la potencia instalada y, por consiguiente, la energía generada por planta al año. Para la fase de la operación de la planta SMR se ha partido de los datos de la operación de una planta PWR. Para que esta aproximación sea lo más ajustada posible al caso de SMR, a la hora de aplicar el factor de escala, en primer lugar, se parte de datos de energía generada al año por cada una de las plantas. Para una planta tipo PWR se han propuesto $8,67 \times 10^9$ kWh/año mientras que para una SMR se han planteado $1,90 \times 10^9$ kWh/año [20]. Considerando una linealidad en la relación energía generada y consumos en una planta a la hora de la operación de la misma y sus mantenimientos, se han calculado las entradas y las salidas para dicho proceso. El uso de la base de datos para simular la operación de la planta SMR se entiende que no introduce errores significativos debido a sus similitudes en los procesos de operación.

La operación de la planta para la obtención del kWh de referencia se ha simulado de la misma manera que para PWR, pero escalando los datos a una potencia instalada de 300MW [20], frente a los 1000MW que ofrece un PWR. En este paso se ha incluido el tratamiento de los residuos radiactivos generados durante la operación de la planta.

E. Construcción y desmantelamiento de la planta

El inventario de la construcción y desmantelamiento de una planta de tipo SMR no se encuentra en Ecoinvent®, de modo que se ha extraído la información de una fuente externa [20] ya que, uno de los principales elementos diferenciadores entre PWR y SMR es la funcionalidad de las plantas.

F. Construcción de almacenamientos intermedios y finales de residuos

La construcción de los depósitos para los residuos generados se ha simulado de la misma forma que para PWR, considerando depósitos intermedios y finales para residuos de alta radiactividad y baja radiactividad en función de si se trata de ciclo abierto o cerrado.

Todas las etapas anteriores son las comunes para ciclo abierto y cerrado. A continuación, van a describirse los elementos diferenciadores entre ambos ciclos.

4.2.2.1. Ciclo abierto

La composición del combustible es única y exclusivamente formada por combustible virgen. De la misma manera que para PWR, se han considerado residuos de alto y bajo nivel de radiactividad para los cuales se han aplicado procesos de almacenamiento. En consecuencia, en el apartado de construcción de los almacenamientos se han considerado tanto los de alto nivel de radiactividad como los de bajo.

4.2.2.2. Ciclo cerrado

En la fabricación de combustible se incluye el combustible reprocesado en forma de MOX, de modo que la cantidad de combustible “virgen” es menor [24]. El almacenamiento de los residuos de alto nivel de radiactividad no se va a contabilizar, sino que en su lugar se va a incluir una etapa de reprocesado. Sin embargo, la gestión de los residuos de bajo nivel de radiactividad se mantiene, ya que se entiende que se van a generar igualmente y no son elementos aprovechables como combustible reprocesado.

4.2.3.HWR

La tecnología HWR difiere en ciertos aspectos con respecto al resto de tecnologías analizadas. La principal diferencia detectada y que afecta al análisis de ciclo de vida es que el uranio empleado para la producción de la energía se trata de uranio natural, en lugar de uranio enriquecido como en LWR. Esta diferencia en el combustible empleado hace que el proceso de obtención difiera de los anteriores descritos. Otra gran diferencia es el uso de agua pesada como refrigerante y moderador de neutrones, lo cual hace que haya un nuevo elemento necesario de ser analizado.

Con respecto al cálculo del ciclo del combustible, en este caso no se ha considerado ciclo cerrado. Una de las principales referencias mundiales en este tipo de tecnología es Canadá, la cual actualmente no ha llevado a cabo ninguna tentativa de reprocesado del combustible y, además, no existe un plan a corto plazo que avance en este campo debido a que el coste de la obtención del

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

combustible no requiere de un coste significativo frente al valor de la electricidad generada por el mismo [25]. Por el contrario, existen dos plantas en la India de tipo HWR las cuales sí llevan a cabo reprocesado del combustible [26]. Concretamente, son dos plantas (*Tarapur y Kalpakkam*) que datan de 1999 y 2003 respectivamente, que llevan a cabo reprocesado de combustible ofreciendo una vía de estudio interesante de cara a afrontar la escasez de recursos minerales en ciertas regiones. Sin embargo, ambos ejemplos corresponden a tecnologías con un desarrollo comercial escaso en el mundo, de los cuales se dispone de poca información al llevarse a cabo en un número limitado de plantas en la actualidad. Como consecuencia a todo esto, se ha considerado no llevar a cabo el estudio del ciclo cerrado del combustible para la tecnología HWR.

La inexistencia de indicadores en la base de datos Ecoinvent® respecto a la tecnología de HWR ha generado la necesidad de recopilar un inventario nuevo, salvo por algunas etapas comunes, a partir de información de otras fuentes publicadas.

A. Minería y fabricación de concentrados

El proceso de minería y molienda se ha simulado de la misma manera que para las dos tecnologías anteriores, teniendo en cuenta tanto minería a cielo abierto como subterránea, ya que el proceso de extracción y molienda no difiere respecto a las tecnologías LWR y SMR.

B. Conversión y fabricación de combustible

En este paso se ha simulado el proceso de conversión, que consiste en la obtención de dióxido de uranio (UO_2) a partir de óxido de uranio concentrado (U_3O_8), además del proceso de la fabricación de combustible [27].

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

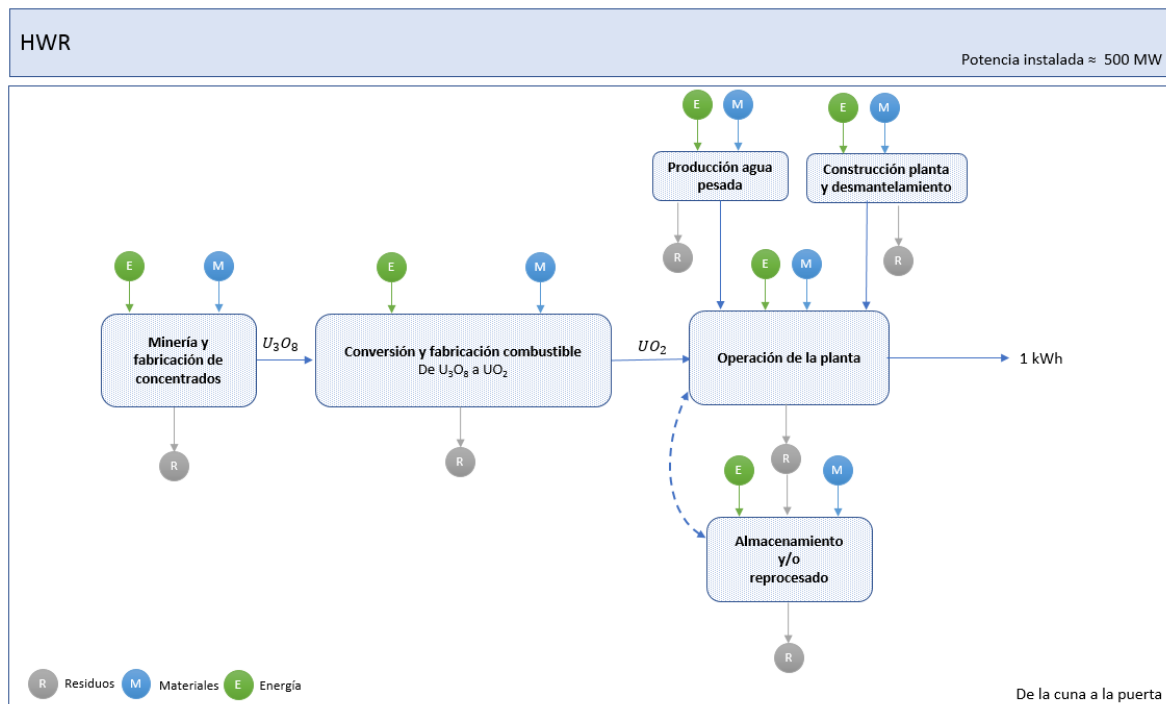


Figura 4-12. Esquema del ciclo de vida de HWR

C. Fabricación agua pesada

Para la fabricación del agua pesada se ha procedido a recopilar un inventario para la obtención de la misma con las entradas y salidas producidas durante el proceso de fabricación. Además, se ha recogido el inventario para poder incluir también el proceso de construcción de la planta de producción de agua pesada [23].

D. Operación de la planta

El proceso de la planta de generación se ha simulado partiendo del existente de PWR incluyendo el insumo de agua pesada y escalando el mismo a la potencia instalada supuesta para HWR. En este caso, se ha aplicado el factor de escala siguiendo el mismo procedimiento que en el caso de la fase de la operación en SMR. Se ha supuesto para una planta de HWR una generación eléctrica al año de $3,94 \times 10^9$ kWh/año [28] mientras que para una planta tipo de PWR, como se ha detallado anteriormente, $8,67 \times 10^9$ kWh/año [20]. Conociendo estas generaciones eléctricas anuales y considerando una linealidad entre la electricidad producida y las entradas y salidas de un proceso de operación, se ha escalado para HWR. Además del factor de escala, en este proceso también se ha incluido el insumo de agua pesada para la operación de la planta. En este caso, al realizar una aproximación entre una planta de HWR y PWR es posible que se asuma cierto error ya que la operación no es exactamente igual. Si bien es cierto que el principal rasgo diferenciador entre

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

ambos procesos es el insumo del agua pesada lo cual sí se está simulando dentro del proceso de operación.

Dentro de esta etapa se ha incluido la generación de los residuos radiactivos por la propia operación de la planta. Al tratarse de ciclo abierto, se ha considerado un proceso de almacenamiento de residuos tanto para los de alto nivel de radiactividad como para los de bajo nivel.

E. Construcción planta y desmantelamiento

Se ha creado el indicador de la construcción y desmantelamiento de la planta HWR partiendo de los datos de un reactor avanzado de agua pesada (AHWR) [23].

F. Construcción de almacenamientos intermedios y finales de residuos

La construcción de almacenamientos intermedios y finales de residuos se han simulado de la misma manera que los de SMR y LWR, considerando la construcción de almacenamiento para residuos de alto nivel de radiactividad y de bajo nivel.

4.3. Evaluación de impactos

Como se ha especificado en el apartado de “Recopilación del inventario”, la unidad funcional del estudio es 1kWh, de forma que todos los resultados aquí presentados se encuentran todos referenciados a esa unidad funcional.

La metodología ReCiPe® escogida para la evaluación de los resultados permite transformar las categorías de impacto en una puntuación única (en puntos, Pt). Esta puntuación se calcula a partir de factores de normalización que permiten referenciar las categorías de impacto a una magnitud relativa, estas, a su vez, se agrupan para obtener las tres categorías de daño. Por último, gracias a los factores de ponderación que otorgan un peso determinado a cada una, se obtiene la puntuación única.

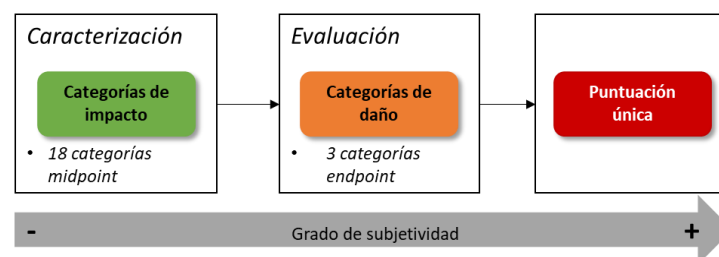


Figura 4-13. Proceso de obtención de los resultados (metodología ReCiPe®)

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

A continuación, se muestran los resultados desde la puntuación única hasta las 18 categorías de impacto.

En un primer análisis se puede determinar que la tecnología que mayores impactos supone al medio es SMR de ciclo abierto (CA) mientras que la de ciclo cerrado (CC) es la segunda menos contribuyente. Seguido de la tecnología de SMR se encuentra la de HWR de ciclo abierto. Por último, las tecnologías PWR ciclo abierto y ciclo cerrado se encuentran en el primer puesto y tercero respectivamente en sentido ascendente, siendo la tecnología PWR ciclo cerrado la que menos impactos supone al medio.

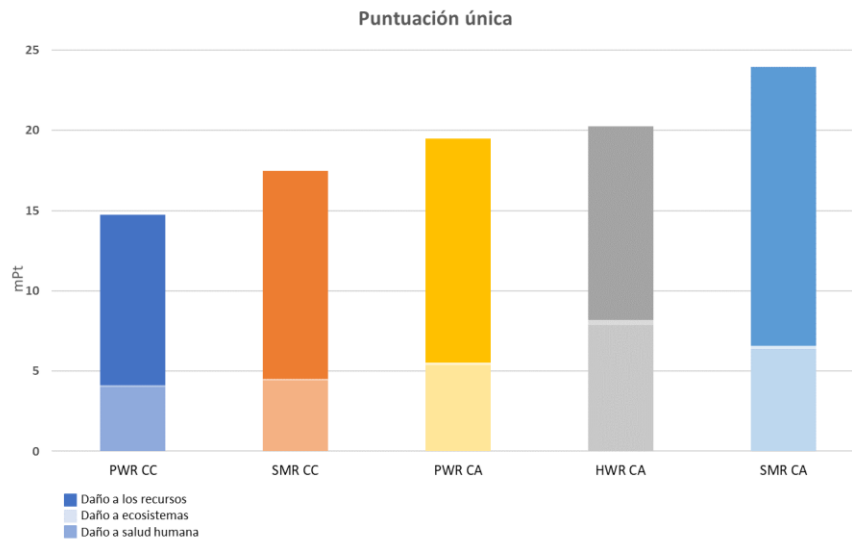


Figura 4-14. Puntuación única para las tecnologías evaluadas⁵

En la Figura 4-15 se representan las categorías de daño que componen la puntuación única que son daño a la salud humana, daño a los ecosistemas y daño a los recursos. Estas categorías están definidas en la Figura 4-7. A continuación, se muestran las contribuciones de cada una de las tecnologías a las categorías de daño.

⁵ La leyenda hace referencia a todas las tecnologías, se aplica la escala de color para todos. (oscuro: daño a los recursos, intermedio: daño a la salud humana y claro: daño a los ecosistemas)

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

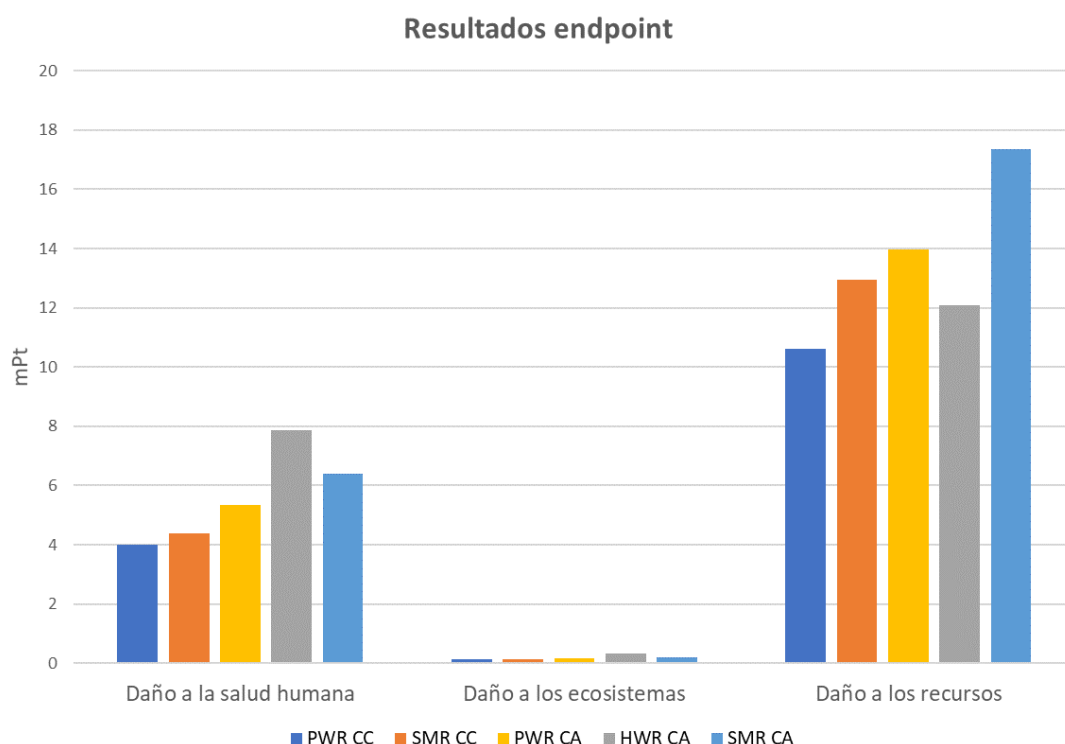


Figura 4-15. Categorías de daño endpoint

En todas las tecnologías evaluadas, se sigue la misma tendencia: la categoría de daño que se ve más afectada es el daño a los recursos. Esto puede verse justificado por el consumo de recursos no renovables (extracción de uranio mineral) que exige este tipo de tecnología. Le sigue la categoría de daño a la salud humana principalmente por la radiación ionizante provocada por los procesos necesarios para la obtención de energía mediante este tipo de generación.

Para poder analizar qué categorías de impacto conforman estas tres categorías de daño es necesario analizar los resultados procedentes del primer paso de caracterización (Figura 4-16).

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

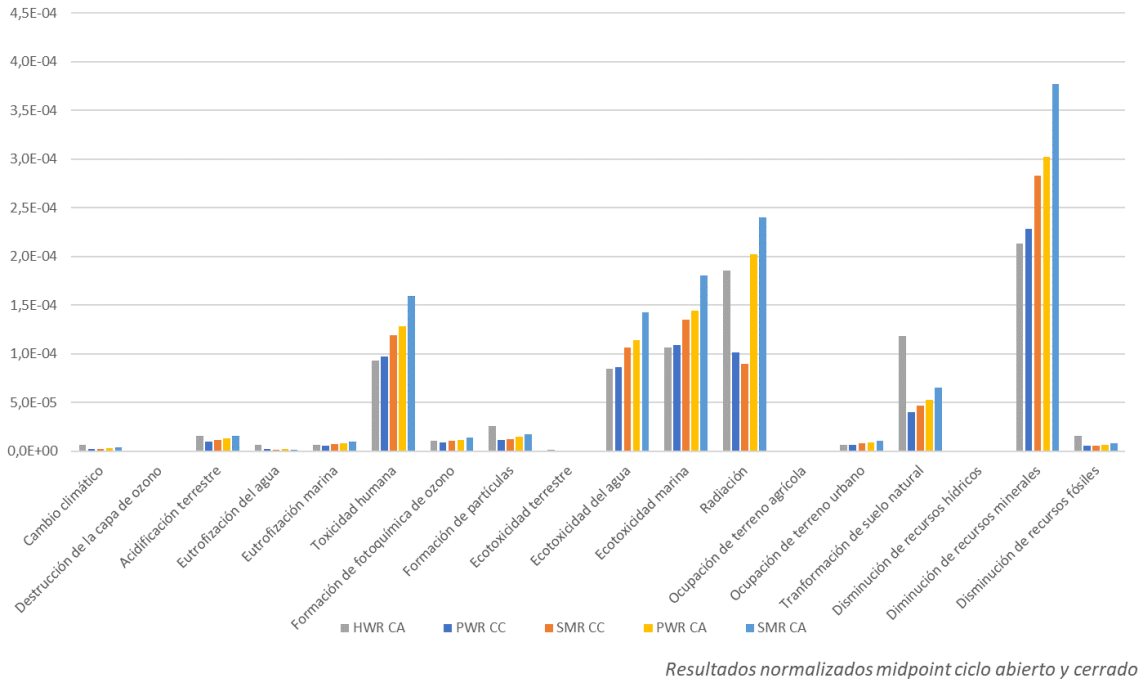


Figura 4-16. Categorías de impacto *midpoint*

En la figura anterior se desglosan las categorías de impacto *midpoint*, para cada una de las tecnologías analizadas. Estos resultados están normalizados a una magnitud relativa para poder representarlos (sin normalizar, ver Anexo II). A nivel general, se puede observar que las categorías de impacto que se ven más afectadas son la disminución de recursos minerales, radiación, toxicidad humana, ecotoxicidad del agua dulce y marina. Por otro lado, destaca también la categoría de transformación de suelo natural, en la cual se ve que la tecnología HWR contribuye de manera significativa. El resto de categorías, incluyendo cambio climático, contribuyen alrededor del 15% del total demostrando así que se trata de una tecnología baja en emisiones GEI. Los resultados para cada etapa del ciclo del combustible se adjuntan en el Anexo.

A continuación, se adjuntan las gráficas que describen en qué medida afecta cada una de las etapas del ciclo del combustible a las categorías de impacto evaluadas.

En la

Figura 4-17 se representan las distribuciones de las categorías de impacto *midpoint* para cada una de las tecnologías evaluadas.

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

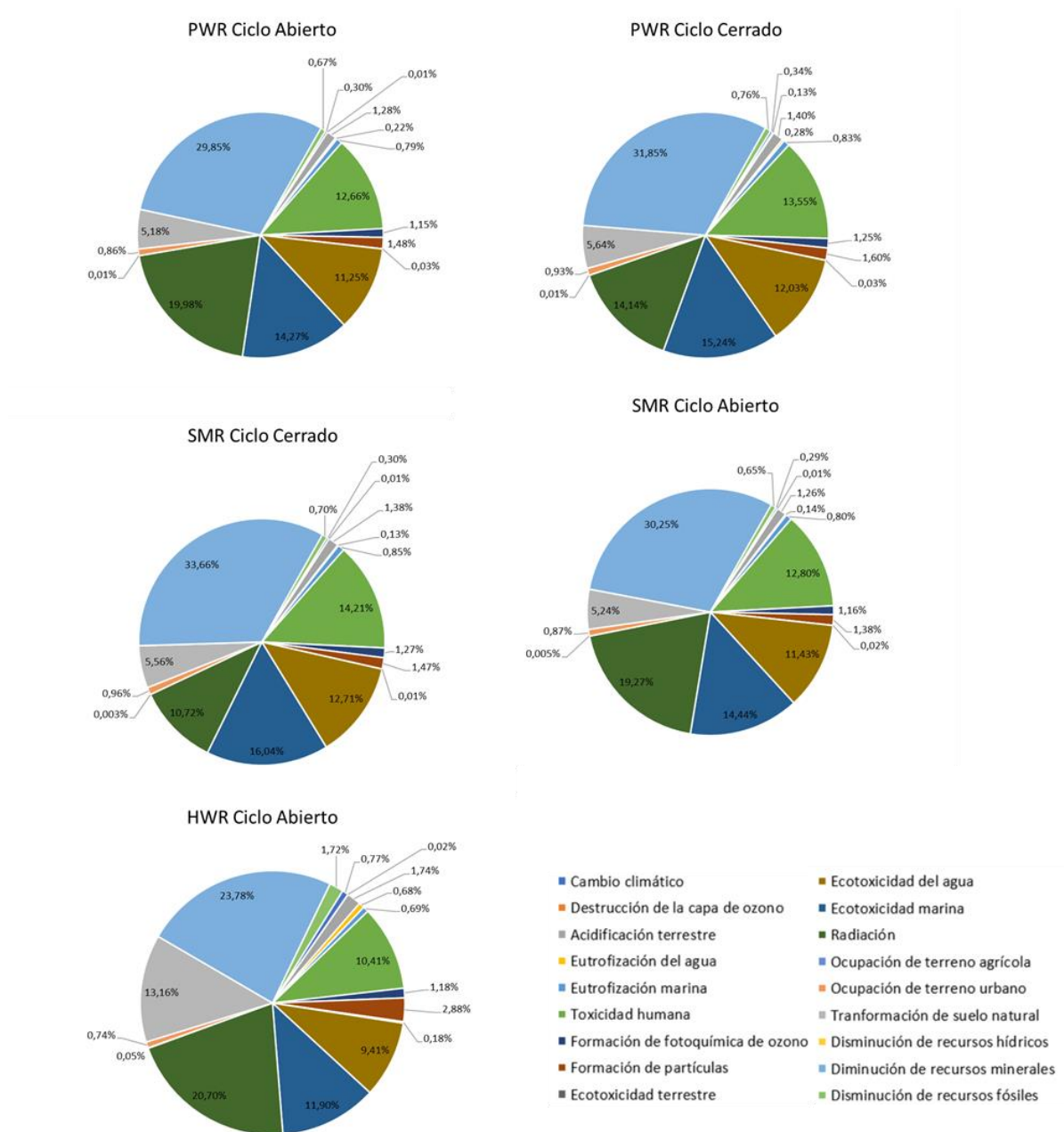


Figura 4-17. Contribuciones de las tres tecnologías a las diferentes categorías de impacto

Observando las gráficas por porcentajes para cada una de las tecnologías puede verse que todas presentan una distribución similar. En el caso de HWR, la contribución a la categoría de disminución de recursos minerales es algo menor que en otros casos porque otras categorías como acidificación terrestre y formación de partículas, entre otras contribuyen en mayor medida.

5. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos permiten llegar a conclusiones sobre los impactos ambientales generados por las tecnologías de generación nuclear. Estas conclusiones son de diversa índole: por un lado, se puede estudiar de forma concreta los resultados del ACV para el caso de la generación nucleoelectrica atendiendo a las distintas etapas y tecnologías estudiadas; por otro lado, se puede llegar a conclusiones más generales que aplican a la energía nuclear desde una perspectiva global.

En cuanto a las cuestiones concretas del ACV, las conclusiones extraídas provienen del análisis de los resultados en apartado 4.3. Como se describe en la Figura 4-14, la tecnología que más incide sobre el medio es SMR ciclo abierto, por encima de PWR lo cual concuerda con que PWR ofrece mayores eficiencias respecto a SMR. Esto se debe a que la cantidad de combustible de uranio de partida para la obtención de 1kWh de energía final es mayor para la tecnología SMR por encima de PWR y HWR [20]. No obstante, este análisis se restringe al ámbito medioambiental por lo que no representa las ventajas típicas que ofrecen los reactores SMR frente a otras tecnologías en cuanto a seguridad, funcionalidad de la construcción, rentabilidad etc. A las tecnologías de PWR y SMR en ciclo abierto les sigue HWR, que supone menores impactos debido al procesado del uranio que requiere de menos etapas ya que no se dan procesos de enriquecimiento, sin embargo, se encuentra por encima de las de ciclo cerrado debido al agua pesada, etapa demandante de energía y recursos.

En la Figura 4-16 se puede observar que las tres tecnologías evaluadas, tanto en ciclo cerrado como en abierto, presentan una distribución de los impactos similar. HWR, sin embargo, muestra una distribución distinta en transformación de suelo natural, formación de partículas y cambio climático mostrando mayores valores que el resto. Esto se debe a la necesidad de la producción de agua pesada, concretamente, al proceso de construcción de la planta de producción y a la energía necesaria para su obtención. La categoría de transformación de suelo natural se ve afectada por la construcción de la planta y las categorías de formación de partículas y cambio climático se deben a la demanda energética necesaria.

Las dos tecnologías más ventajosas en términos ambientales, según el estudio llevado a cabo, son las de SMR y PWR ciclo cerrado, lo cual resulta coherente debido a el aprovechamiento del residuo como combustible, eliminando así del ciclo de vida cierta proporción de residuos y requiriendo menos cantidad de uranio primario o “virgen” para la misma producción energética.

En cuanto al proceso que más contribuye en cada uno de los análisis de ciclo de vida es, en todos los casos, la minería y la fabricación de concentrados. Se puede considerar como punto crítico en todos los ACV debido a la explotación de un recurso mineral no renovable, del consumo energético

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

que requiere todo el proceso y de la contaminación de aguas como consecuencia de las actividades en los emplazamientos mineros [29].

Finalmente, en cuanto a la conclusión general del estudio y, por consiguiente, de la generación de electricidad con origen nuclear, es interesante contrastar los resultados con los principales puntos críticos medioambientales asociados a la producción de electricidad. Todo ello, con la vista en el estudio comparativo de las distintas alternativas energéticas y la posible incorporación de la energía nuclear en el marco energético de Chile.

A la hora de llevar a cabo un análisis de cuáles son las problemáticas ambientales relacionadas con la producción energética resulta evidente tener en cuenta el tipo de generación. Sin embargo, debido a la gravedad de algunos aspectos ambientales y a ciertas características comunes que se comparten entre la generación eléctrica, es posible hacer una priorización de problemáticas ambientales.

Todas las alternativas de generación de electricidad suponen un impacto al medioambiente, sin embargo, el grado de dicho impacto dependerá de cómo se genera y se transporta dicha energía. Teniendo en cuenta esto, es posible hacer una priorización de los impactos que se ven afectados a nivel general. Estos pueden considerarse los puntos críticos a la hora de evaluar el desempeño ambiental de una tipología de generación eléctrica, es decir, evaluar cómo contribuyen a dichos puntos críticos.

Se describen a continuación los principales impactos ambientales producidos por la generación de electricidad [30]:

- **Punto crítico 1** → Emisiones de **gases de efecto invernadero y otros contaminantes al aire:**

Actualmente, los esfuerzos en materia de medio ambiente y energía se están centrando en la mitigación de la contribución al cambio climático por parte de la generación de electricidad. Esto ha desembocado en una nueva línea de investigación en tecnologías que contribuyan a una economía y sociedad baja en carbono para el año 2050 [31]. Otra problemática estrechamente relacionada con el cambio climático y la producción eléctrica es el consumo de recursos fósiles. El camino hacia una tecnología de generación eléctrica baja en carbono puede conllevar beneficios colaterales como una disminución en el consumo de recursos fósiles al no depender estas tecnologías del uso de dichos recursos.

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

Por otro lado, las emisiones de gases contaminantes, no necesariamente GEI, pueden contribuir a otras problemáticas como son la disminución de la capa de ozono o la creación de smog fotoquímico.

- **Punto crítico 2** → Uso de **agua** para los procesos en los que se requiere para crear vapor de agua, refrigeración y otros usos.

El agua subterránea es el único recurso permanente de agua dulce en muchas regiones además de proveer de un neutralizador frente a climas extremos. Por otro lado, resulta un recurso imprescindible para el agua de consumo, para la seguridad alimenticia y para la supervivencia de los ecosistemas.

La disminución de los recursos hídricos podría tener una consecuencia directa en la calidad del agua, concretamente uno de los peligros más probables es la contaminación con agua de mar debido a la posible mezcla de ambos tipos de agua al requerir extraer agua de zonas más profundas.

- **Punto crítico 3** → Descargas de **contaminantes** en cuerpos de **agua** incluyendo la contaminación térmica

Una de las principales consecuencias de la contaminación del agua es la pérdida de la biodiversidad de dicho medio. Por otro lado, puede tener consecuencias directas en la salud humana al poder llegar a consumir agua contaminada.

La contaminación térmica supone también un gran impacto a la biodiversidad del medio ya que puede afectar a los equilibrios ecosistémicos pudiendo desembocar en un ambiente inhabitable para según qué especies de animales o plantas.

- **Punto crítico 4** → Generación de **residuos sólidos** incluidos residuos peligrosos

Las consecuencias de la generación de residuos acarrean una serie de problemáticas asociadas, no solo medioambientales sino también sociales, económicas y sanitarias. Tomando como referencia las problemáticas ambientales se puede destacar el consumo de recursos, ocupación del espacio, deterioro del paisaje, contaminación de suelo, agua y aire, mayor riesgo de incendios entre otras.

- **Punto crítico 5** → **Uso del suelo** para la producción de combustible, generación de energía y líneas de distribución de la electricidad generada.

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

La ganancia de terreno en favor de industria y en detrimento de paisaje natural conlleva asociados numerosos impactos negativos al medioambiente. La pérdida de bosque elimina valiosos sumideros de CO₂ los cuales contribuyen a la disminución de gases de efecto invernadero en la atmósfera.

- **Punto crítico 6 → Efectos negativos en plantas, animales y ecosistemas** como resultado de los impactos sobre aire, agua y suelo descritos en los anteriores puntos.

Una vez expuestos estos puntos críticos entre el medio ambiente y la generación eléctrica se puede llevar a cabo un diagnóstico de la generación nuclear respecto a dichos puntos.

La generación nuclear se presenta como una gran alternativa respecto a las emisiones de gases de efecto invernadero. Esta tecnología de generación eléctrica, según la identificación de impactos llevada a cabo mediante el ACV, no contribuye de manera significativa al cambio climático debido a las bajas emisiones de gases de efecto invernadero. Durante todas las etapas y procesos evaluados hasta la generación de 1kWh, se puede decir que la contribución a cambio climático es mínima. Al no tratarse de una tecnología que dependa de combustibles fósiles para la generación energética, el consumo de estos recursos no supone uno de los puntos críticos a destacar, lo cual hace a la generación nuclear elevarse como una tecnología alternativa para evitar el agotamiento de recursos fósiles. Si bien es cierto que sí depende de recursos minerales también de naturaleza no renovable para la extracción del uranio.

El bajo ratio de emisiones contribuyentes a la disminución de la capa de ozono generadas por la tecnología de generación nuclear también pueden suponer un punto a tener en cuenta en pro de las centrales nucleares.

El consumo del agua tampoco es un impacto significativo entre todos los evaluados. Sin embargo, sí que existe una contribución a la alteración de la calidad del agua, expresado en la categoría de impacto de ecotoxicidad del agua, tanto dulce como marina. El hecho de emplear recursos hídricos tiene asociado la modificación de algunas de sus características como la emisión controlada de efluentes o las variaciones en la temperatura del agua en zonas próximas al canal de descarga.

La problemática relacionada con los residuos reside en la generación de residuos peligrosos debido al componente radiactivo de los mismos. Sin embargo, dada la peligrosidad de los residuos sólidos que genera este tipo de tecnología la gestión de los mismos es un aspecto altamente controlado con el objetivo de reducir al máximo sus efectos al medio y la salud humana.

El uso del suelo es un impacto intrínseco a cualquier actividad de carácter no natural, esto quiere decir que cualquier tecnología de generación eléctrica va a tener un factor de uso del suelo propio.

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

Es cierto que lo que marca la diferencia entre tecnologías es este factor de uso de suelo, es decir, la cantidad de hectáreas que son necesarias para la producción de energía. Tras analizar los ACV de las tecnologías de generación nuclear seleccionadas sí que existe cierta contribución al uso y transformación del suelo, pero entre todos los resultados, no se trata de uno de los más significativos.

Todo lo anterior conduce a afirmar que la energía nuclear es una buena alternativa para poder contribuir a un futuro bajo en emisiones. Esta es una de las principales conclusiones que se pueden extraer de este estudio y que, como se analizará en los siguientes informes, diferencia de manera determinante la generación de energía nuclear de potencia de otros tipos de tecnologías de generación eléctrica.

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

6. REFERENCIAS

- [1] *ISO 14040 - Análisis de Ciclo de Vida - Principios y marco de referencia*, 2006.
- [2] *ISO 14044 - Análisis del Ciclo de Vida - Requisitos y directrices*, 2006.
- [3] Power Reactor Information System (PRIS), IAEA, 2018.
<https://www.iaea.org/PRIS/home.aspx>
- [4] Construction Technologies for Nuclear Power Plants- No. NP-T-2.5, IAEA Nuclear Energy Series, 2011.
- [5] Environmental Impact Assessment Report for a Nuclear Power Plant, Fennovoima, February 2014.
<https://www.fennovoima.fi/userData/fennovoima/doc/yva/yva2013/EIAreport2014.pdf>
- [6] Estimación de las dosis a la población por la exposición debida al funcionamiento de las instalaciones nucleares y radiactivas del ciclo de combustible, y a la radiación natural. Análisis realizados en el marco del estudio epidemiológico, Consejo de Seguridad Nuclear (CSN). Colección de Informes Técnicos 25.2010, 2010.
https://www.csn.es/images/stories/publicaciones/unitarias/informes_tecnicos/estudio_epidemiologico.pdf
- [7] Desmantelamiento y clausura de Centrales Nucleares, Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), 2008.
- [8] Working Party on Decommissioning and Dismantling (WPDD). Topical Session on Materials Manageme, NEA/RWM/WPDD(2002, December 2001.
- [9] Radioactive Waste Management Committee. The NEA co-operative programme on decommissioning decontamination and demolition of concrete structures, NEA/RWM/R(2011)1.

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

- [10] Decommissioning of nuclear facilities. Feasibility, needs and costs, NEA.
- [11] M. P. José M. Martínez-Val, Reactores Nucleares, Escuela Técnica de Ingenieros Industriales (Universidad Politécnica de Madrid).
- [12] Curso Básico de Ciencia y Tecnología Nuclear, Sociedad Nuclear Española .
- [13] NuScale Power.
<http://www.nuscalepower.com/>
- [14] Heavy Water Reactors: Status and Projected Development. Technical Reports Series No. 407., IAEA, 2002.
- [15] Canadian Nuclear Association.
<https://cna.ca/>
- [16] Serie de Ponencias: Curso de Gestión de Residuos Radiactivos, Universidad Politécnica de Madrid, CIEMAT, ENRESA, 2016.
- [17] Uranium 2016: Resources, Production and Demand, NEA-IAEA, 2016.
- [18] Netherlands National Institute for Public Health and the Environment, Ministry of Health, Welfare and Sport.
https://www.rivm.nl/en/Topics/L/Life_Cycle_Assessment_LCA/ReCiPe
- [19] Anuario Estadístico de Energía, Comisión Nacional de Energía - Gobierno de Chile, 2016.
- [20] The environmental competitiveness of small modular reactors: A life cycle study, Travis S.Carless, W. Michael Griffin, Paul S. Fischbeck, 2016.

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

- [21] World Nuclear Association, 2014.
<http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/mining-of-uranium/uranium-mining-overview.aspx>
- [22] Sociedad Nuclear Española (SNE), 2010.
<https://www.sne.es/>
- [23] Life-cycle impacts from novel thorium-uranium-fuelled nuclear energy, S.F. Ashley, R.A. Fenner, W.J. Nuttall, G.T. Parks, 2015.
- [24] Nuclear Fuel Cycle: Which strategy to support a sustainable growth for nuclear energy?, Jean-Dominique Barbat, Renaud Liberge, 2012.
- [25] Status of nuclear fuel reprocessing, partitioning and transmutation, vol. VI, Canada: Jackson, David P. NMWO Nuclear Waste Management Organization.
- [26] Status of power reactor fuel reprocessing in India, Kansra, V. P. IAEA, 1999.
- [27] Candu Reactors and Greenhouse Gas Emissions, Proceedings of the 19th Annual Conference. S. Andseta, M.J. Thompson.
- [28] Heavy Water Reactors: Status and Projected Development, IAEA, 2002.
- [29] Minería y tratamiento del uranio: Evaluación de las cuestiones relativas a la restauración del medio ambiente, Giorgio Gnugnoli, Michele Laraia, Peter Stegnar, IAEA.
- [30] Energy and Environment, United States Environmental Protection Agency (EPA), 2017.
<https://www.epa.gov/energy/about-us-electricity-system-and-its-impact-environment#impacts>

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

- [31] «Energy and Environment,» United States Environmental Protection Agency (EPA), 2017.
<https://www.epa.gov/energy/about-us-electricity-system-and-its-impact-environment#impacts>
- [32] J. J. Whitlock, «The evolution of CANDU fuel cycles and their potential contribution to world peace,» Atomic Energy of Canada Limited (AECL), Canada.

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

ANEXO 1

**Categorías de impacto midpoint sin
normalizar para cada tecnología y
para cada etapa del ciclo del
combustible**

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

Hoja en blanco intencionadamente

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

	Unidad	SMR CA	PWR CA	PWR CC	HWR CA	SMR CC
<i>Cambio climático</i>	g CO ₂ eq	40,09	34,04	27,42	77,13	28,61
<i>Destrucción de la capa de ozono</i>	g CFC-11 eq	2,6E-06	2,2E-06	2,1E-05	4,5E-06	1,8E-06
<i>Acidificación terrestre</i>	g SO ₂ eq	0,54	0,44	0,35	0,54	0,40
<i>Eutrofización del agua</i>	g P eq	7,4E-04	9,3E-04	8,2E-04	2,5E-03	4,4E-04
<i>Eutrofización marina</i>	g N eq	0,10	0,08	0,06	0,06	0,07
<i>Toxicidad humana</i>	g 1,4-DB eq	100,34	80,62	61,14	58,71	75,02
<i>Formación de fotoquímica de ozono</i>	g NMVOC	0,82	0,66	0,51	0,60	0,61
<i>Formación de partículas</i>	g PM ₁₀ eq	0,26	0,22	0,17	0,38	0,18
<i>Ecotoxicidad terrestre</i>	g 1,4-DB eq	1,7E-03	2,3E-03	1,8E-03	1,3E-02	8,0E-04
<i>Ecotoxicidad del agua</i>	g 1,4-DB eq	1,568	1,253	0,949	0,928	1,174
<i>Ecotoxicidad marina</i>	g 1,4-DB eq	1,565	1,256	0,951	0,928	1,171
<i>Radiación</i>	Bq ²³⁵ U eq	1.501,90	1.264,19	634,07	1.159,98	562,24
<i>Ocupación de terreno agrícola</i>	m ² a	2,6E-04	3,9E-04	3,3E-04	2,2E-03	1,3E-04
<i>Ocupación de terreno urbano</i>	m ² a	4,4E-03	3,6E-03	2,7E-03	2,7E-03	3,3E-03
<i>Transformación de suelo natural</i>	m ²	1,1E-05	8,5E-06	6,5E-06	1,9E-05	7,5E-06
<i>Disminución de recursos hídricos</i>	m ³	3,7E-02	5,0E-02	5,1E-02	2,1E-01	1,9E-02
<i>Disminución de recursos minerales</i>	g Fe eq	269,42	215,82	163,20	152,31	201,84
<i>Disminución de recursos fósiles</i>	g oil eq	12,65	10,59	8,43	23,97	9,12

LWR CA		Minería y fabricación de concentrados	Conversión	Fabricación de combustible	Operación de la planta	Construcción de la planta	Construcción de almacenamientos
<i>Cambio climático</i>	g CO ₂ eq	29,77	2,01	0,36	3,37E-05	5,39E-12	1,54E-13
<i>Destrucción de la capa de ozono</i>	g CFC-11 eq	1,82E-06	2,22E-07	2,55E-08	8,27E-07	2,61E-19	6,35E-21
<i>Acidificación terrestre</i>	g SO ₂ eq	0,42	0,01	2,471E-03	3,56E-05	3,31E-14	8,39E-16
<i>Eutrofización del agua</i>	g P eq	5,52E-04	7,93E-05	2,97E-05	3,59E-05	8,73E-16	3,20E-17
<i>Eutrofización marina</i>	g N eq	7,97E-02	2,80E-04	2,33E-04	6,03E-06	1,39E-15	2,74E-17
<i>Toxicidad humana</i>	g 1,4-DB eq	80,02	0,10	0,11	4,91E-05	1,29E-12	5,79E-14
<i>Formación de fotoquímica de ozono</i>	g NMVOC	0,64	0,01	2,41E-03	2,24E-05	2,64E-14	6,52E-16
<i>Formación de partículas</i>	g PM ₁₀ eq	0,20	0,01	2,57E-03	4,23E-05	4,88E-14	7,10E-16
<i>Ecotoxicidad terrestre</i>	g 1,4-DB eq	1,01E-03	3,32E-04	1,24E-04	2,36E-06	2,62E-15	3,50E-17
<i>Ecotoxicidad del agua</i>	g 1,4-DB eq	1,25	1,89E-03	1,23E-03	3,79E-05	2,48E-15	5,97E-17
<i>Ecotoxicidad marina</i>	g 1,4-DB eq	1,25	2,30E-03	1,46E-03	9,42E-05	1,49E-14	6,13E-16
<i>Radiación</i>	Bq ²³⁵ U eq	1144,84	36,25	4,94	5,93E-02	9,52E-14	2,82E-15
<i>Ocupación de terreno agrícola</i>	m ² a	0,18	0,04	0,01	1,82E-06	4,43E-13	1,66E-14
<i>Ocupación de terreno urbano</i>	m ² a	3,48	0,01	0,01	2,75E-06	1,32E-13	5,48E-15
<i>Transformación de suelo natural</i>	m ²	8,58E-03	5,31E-04	8,23E-05	2,74E-06	2,50E-16	-9,45E-18
<i>Disminución de recursos hídricos</i>	m ³	18,78	8,91	2,48	0,00E+00	4,63E-11	6,44E-13
<i>Disminución de recursos minerales</i>	g Fe eq	215,03	0,08	0,18	4,32E-05	2,13E-12	7,01E-14
<i>Disminución de recursos fósiles</i>	g oil eq	9,32	0,64	0,10	5,65E-05	1,37E-12	2,95E-14

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

LWR CC		Minería fabricación concentrados	y de Conversión	Fabricación de combustible	Operación de la planta ⁴	Construcción de la planta	Construcción de almacenamientos
Cambio climático	g CO ₂ eq	22,40	1,48	2,33	-8,79E-01	5,39E-12	1,36E-13
Destrucción de la capa de ozono	g CFC-11 eq	1,37E-06	1,63E-07	0,00	-6,47E-08	2,61E-19	5,56E-21
Acidificación terrestre	g SO ₂ eq	0,32	0,01	0,01	-4,75E-03	3,31E-14	7,37E-16
Eutrofización del agua	g P eq	4,16E-04	5,84E-05	1,27E-04	-1,02E-04	8,73E-16	2,83E-17
Eutrofización marina	g N eq	6,00E-02	2,06E-04	1,00E-03	-1,60E-03	1,39E-15	2,41E-17
Toxicidad humana	g 1,4-DB eq	60,21	0,08	0,50	-1,41E-01	1,29E-12	5,12E-14
Formación de fotoquímica de ozono	g NMVOC	0,48	4,81E-03	1,05E-02	-2,91E-03	2,64E-14	5,70E-16
Formación de partículas	g PM ₁₀ eq	0,15	4,15E-03	6,03E-03	-5,66E-03	4,88E-14	6,27E-16
Ecotoxicidad terrestre	g 1,4-DB eq	7,57E-04	2,44E-04	2,19E-04	-3,48E-04	2,62E-15	3,11E-17
Ecotoxicidad del agua	g 1,4-DB eq	9,40E-01	1,39E-03	7,18E-03	-4,06E-04	2,48E-15	5,23E-17
Ecotoxicidad marina	g 1,4-DB eq	0,94	0,00	6,63E-03	-1,74E-03	1,49E-14	5,42E-16
Radiación	Bq ²³⁵ U eq	861,35	26,68	13,61	-2,69E+02	9,52E-14	2,45E-15
Ocupación de terreno agrícola	m ² a	0,13	0,03	0,05	-5,35E-02	4,43E-13	1,47E-14
Ocupación de terreno urbano	m ² a	2,62	7,18E-03	0,04	-1,16E-02	1,32E-13	4,81E-15
Transformación de suelo natural	m ²	6,46E-03	3,90E-04	3,66E-04	-2,69E-04	2,50E-16	-7,57E-18
Disminución de recursos hídricos	m ³	14,13	6,56	14,82	-1,59E+00	4,63E-11	5,69E-13
Disminución de recursos minerales	g Fe eq	161,78	0,06	0,75	-1,78E-01	2,13E-12	6,11E-14
Disminución de recursos fósiles	g oil eq	7,01	0,47	0,59	-2,01E-01	1,37E-12	2,58E-14

⁴ Estos valores son negativos porque en esta etapa se contabiliza el reprocesado del combustible y el programa SimaPro considera que reprocesar el combustible contribuye de manera positiva, "recompensando" el cómputo global

HWR CA	Minería fabricación concentrados	y de Conversión	y de Fabricación de combustible	Operación de la planta	Construcción de la planta	Construcción de almacenamientos
Cambio climático	20,90	1,15E-02	3,84	5,22E+01	1,37E-01	
Destrucción de la capa de ozono	1,28E-06	3,37E-10	1,18E-07	3,06E-06	5,59E-09	
Acidificación terrestre	0,30	6,84E-05	2,165E-02	2,17E-01	7,41E-04	
Eutrofización del agua	3,88E-04	1,03E-06	3,77E-04	1,73E-03	2,83E-05	
Eutrofización marina	5,60E-02	3,44E-06	9,86E-04	5,82E-03	2,42E-05	
Toxicidad humana	56,19	3,33E-04	0,34	2,12E+00	5,13E-02	
Formación de fotoquímica de ozono	0,45	5,27E-05	1,71E-02	1,30E-01	5,74E-04	
Formación de partículas	0,14	1,50E-04	3,87E-02	2,06E-01	6,28E-04	
Ecotoxicidad terrestre	7,06E-04	8,14E-06	2,06E-03	1,07E-02	3,11E-05	
Ecotoxicidad del agua	0,88	4,98E-06	1,51E-03	4,92E-02	5,26E-05	
Ecotoxicidad marina	0,88	6,43E-06	4,55E-03	4,65E-02	5,43E-04	
Radiación	803,90	1,05E-04	0,05	3,56E+02	2,47E-03	
Ocupación de terreno agrícola	0,12	5,23E-04	0,14	1,91E+00	1,48E-02	
Ocupación de terreno urbano	2,44	8,32E-05	0,03	2,02E-01	4,85E-03	
Transformación de suelo natural	6,03E-03	1,96E-06	7,53E-04	1,28E-02	-7,95E-06	
Disminución de recursos hídricos	13,19	0,13	34,43	1,64E+02	5,70E-01	
Disminución de recursos minerales	150,99	9,66E-05	0,70	5,59E-01	6,16E-02	
Disminución de recursos fósiles	6,54	3,19E-03	0,95	1,64E+01	2,60E-02	

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

SMR CA		Minería y fabricación de concentrados	Conversión	Fabricación de combustible	Operación de la planta	Construcción de la planta	Construcción de almacenamientos
Cambio climático	g CO ₂ eq	37,28	2,50	0,40	3,91E+00	3,78E-01	2,49E-02
Destrucción de la capa de ozono	g CFC-11 eq	2,28E-06	2,75E-07	2,90E-08	2,95E-01	2,38E-08	9,64E-10
Acidificación terrestre	g SO ₂ eq	0,53	0,01	2,812E-03	1,16E-02	1,71E-03	1,22E-04
Eutrofización del agua	g P eq	6,92E-04	9,85E-05	3,38E-05	3,65E-03	2,44E-05	2,80E-06
Eutrofización marina	g N eq	9,99E-02	3,48E-04	2,66E-04	9,60E-04	5,49E-05	4,10E-06
Toxicidad humana	g 1,4-DB eq	100,22	0,13	0,13	8,01E-04	5,64E-02	5,36E-03
Formación de fotoquímica de ozono	g NMVOC	0,81	0,01	2,74E-03	4,94E-04	1,64E-03	1,19E-04
Formación de partículas	g PM ₁₀ eq	0,25	0,01	2,93E-03	1,07E-04	9,05E-04	8,91E-05
Ecotoxicidad terrestre	g 1,4-DB eq	1,26E-03	4,12E-04	1,41E-04	6,81E-05	2,38E-05	3,13E-06
Ecotoxicidad del agua	g 1,4-DB eq	1,56	2,34E-03	1,40E-03	6,38E-05	1,69E-04	8,75E-06
Ecotoxicidad marina	g 1,4-DB eq	1,56	2,85E-03	1,66E-03	2,98E-05	5,28E-04	5,59E-05
Radiación	Bq ²³⁵ U eq	1433,84	44,99	5,62	1,16E-05	1,64E-02	5,80E-04
Ocupación de terreno agrícola	m ² a	0,22	0,05	0,01	8,18E-06	1,22E-02	1,31E-03
Ocupación de terreno urbano	m ² a	4,35	0,01	0,01	2,22E-06	5,50E-03	2,45E-03
Transformación de suelo natural	m ²	1,07E-02	6,58E-04	9,37E-05	1,65E-06	9,46E-05	-1,20E-05
Disminución de recursos hídricos	m ³	23,52	11,06	2,82	7,02E-07	1,30E+00	7,44E-02
Disminución de recursos minerales	g Fe eq	269,31	0,10	0,20	5,21E-07	1,75E-01	1,06E-02
Disminución de recursos fósiles	g oil eq	11,67	0,80	0,11	1,56E-09	1,18E-01	5,01E-03

SMR CC		Minería y fabricación de concentrados	Conversión	Fabricación de combustible	Operación de la planta	Construcción de la planta	Construcción de almacenamientos
Cambio climático	g CO ₂ eq	27,95	1,87	0,22	-2,00E+00	3,78E-01	1,04E-01
Destrucción de la capa de ozono	g CFC-11 eq	1,71E-06	2,06E-07	0,00	-1,59E-07	2,38E-08	4,22E-09
Acidificación terrestre	g SO ₂ eq	0,40	0,01	0,00	-1,10E-02	1,71E-03	5,60E-04
Eutrofización del agua	g P eq	5,19E-04	7,39E-05	2,08E-05	-2,25E-04	2,44E-05	2,15E-05
Eutrofización marina	g N eq	7,49E-02	2,61E-04	1,08E-04	-2,71E-03	5,49E-05	1,83E-05
Toxicidad humana	g 1,4-DB eq	75,14	0,10	0,02	-3,33E-01	5,64E-02	3,89E-02
Formación de fotoquímica de ozono	g NMVOC	0,61	6,09E-03	1,04E-03	-7,45E-03	1,64E-03	4,33E-04
Formación de partículas	g PM ₁₀ eq	0,19	5,26E-03	2,19E-03	-1,09E-02	9,05E-04	4,76E-04
Ecotoxicidad terrestre	g 1,4-DB eq	9,45E-04	3,09E-04	1,21E-04	-6,25E-04	2,38E-05	2,36E-05
Ecotoxicidad del agua	g 1,4-DB eq	1,17E+00	1,76E-03	1,09E-04	-1,00E-03	1,69E-04	3,98E-05
Ecotoxicidad marina	g 1,4-DB eq	1,17	0,00	2,24E-04	-4,04E-03	5,28E-04	4,12E-04
Radiación	Bq ²³⁵ U eq	1075,03	33,76	2,92	-5,50E+02	1,64E-02	1,86E-03
Ocupación de terreno agrícola	m ² a	0,17	0,04	0,01	-1,24E-01	1,22E-02	1,12E-02
Ocupación de terreno urbano	m ² a	3,26	9,08E-03	0,00	-2,56E-02	5,50E-03	3,66E-03
Transformación de suelo natural	m ²	8,06E-03	4,94E-04	3,63E-05	-5,03E-04	9,46E-05	-5,75E-06
Disminución de recursos hídricos	m ³	17,63	8,30	2,58	-1,18E+01	1,30E+00	4,33E-01
Disminución de recursos minerales	g Fe eq	201,92	0,07	0,03	-4,04E-01	1,75E-01	4,64E-02
Disminución de recursos fósiles	g oil eq	8,75	0,60	0,06	-4,77E-01	1,18E-01	1,96E-02

⁵ Estos valores son negativos porque en esta etapa se contabiliza el reprocesado del combustible y el programa SimaPro considera que reprocesar el combustible contribuye de manera positiva, "recompensando" el cómputo global

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

Hoja en blanco intencionadamente

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

ANEXO 2

Inventario SIMAPRO®

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

Hoja en blanco intencionadamente

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

HWR CA	Cantidad	Unidad
Producción del agua deuterada		
<i>Resources</i>		
Water, cooling, unspecified natural origin	7,20E-04	m3
Water, river	3,75E-03	m3
<i>Materials/fuels</i>		
Consumo de red Chile	1,81E-02	kWh
Steam, in chemical industry	1,70E-01	kg
Hydrogen sulfide	1,98E-05	kg
Construcción planta producción de agua pesada	2,50E-12	p
Construcción de la planta de agua pesada		
<i>Materials/fuels</i>		
Concrete, normal	4,17E-04	m3
Glass fibre	2,18E-01	kg
Aluminium, primary, ingot	4,33E-02	kg
Steel, chromium steel 18/8	2,97E-01	kg
Reinforcing steel	1,97E+00	kg
Copper	2,84E-02	kg
Polyvinylchloride, emulsion polymerised	1,32E-02	kg
Wire drawing, copper	2,84E-02	kg
Sheet rolling, chromium steel	2,97E-01	kg
Sheet rolling, steel	1,97E+00	kg
Waste concrete	6,25E-03	kg
Transport, freight train	2,94E-01	tkm
Municipal solid waste	5,00E-02	kg
Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5	6,02E-01	tkm
<i>Resources</i>		
Transformation, to unknown	3,74E-04	m2
Water, cooling, unspecified natural origin	1,23E-02	m3
Uranium	2,16E-03	kg
Occupation, mineral extraction site	8,22E-03	m2a
Transformation, to mineral extraction site	3,74E-04	m2
Transformation, from unknown	3,74E-04	m2

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

HWR CA	Cantidad	Unidad
Transformation, from industrial area	3,74E-04	m2
Materials/fuels		
Mine infrastructure, open cast, uranium	1,27E-10	p
Blasting	5,34E-04	kg
Electricity/heat	0,00E+00	
Diesel, burned in building machine	3,29E-02	MJ
Diesel, burned in diesel-electric generating set	7,50E-02	MJ
<i>Emissions to air</i>		
Water/m3	1,85E-03	m3
Radon-222	2,67E+02	kBq
Particulates, > 10 um	1,15E-04	kg
Uranium alpha	1,93E-04	kBq
<i>Emissions to water</i>		
Molybdenum	3,29E-06	kg
Aluminium	6,37E-06	kg
Manganese	1,42E-04	kg
Lead	3,70E-05	kg
Selenium	3,90E-07	kg
Water	1,05E-02	m3
Ammonium, ion	1,75E-05	kg
Chloride	1,77E-03	kg
Radium-226	1,03E+01	kBq
Vanadium	1,34E-05	kg
Cadmium	1,91E-07	kg
Suspended solids	4,31E-03	kg
Nitrate	4,31E-06	kg
Uranium alpha	4,52E-01	kBq
Barium	3,90E-06	kg
Iron	6,98E-05	kg
Thorium-230	9,45E-01	kBq
Zinc	2,47E-06	kg
Sulfate	9,86E-02	kg
Magnesium	2,26E-04	kg
Arsenic	1,91E-07	kg

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

HWR CA	Cantidad	Unidad
Conversión y Fabricación de concentrados		
<i>Materials/fuels</i>		
Methanol	2,12E-09	kg
Soap	5,97E-09	kg
Brass	1,19E-08	kg
Steel, low-alloyed, hot rolled	9,95E-07	kg
Low level radioactive waste	-2,09E-09	m3
Municipal solid waste	-1,56E-06	kg
Aluminium, wrought alloy	3,32E-07	kg
Acetylene	1,66E-10	kg
Hydrogen peroxide, without water, in 50% solution state	4,64E-09	kg
Polyvinylchloride, bulk polymerised	5,64E-09	kg
Argon, liquid	1,19E-08	kg
Hydrochloric acid, without water, in 30% solution state	1,33E-09	kg
Concrete, normal	1,92E-09	m3
Nitric acid, without water, in 50% solution state	9,95E-09	kg
Sodium hydroxide, without water, in 50% solution state	1,86E-08	kg
Chemical, organic	5,44E-09	kg
Uranium enrichment centrifuge facility	7,36E-14	p
Phosphoric acid, fertiliser grade, without water, in 70% solution state	7,96E-10	kg
Nitrogen, liquid	2,59E-09	kg
Oxygen, liquid	2,39E-10	kg
Lubricating oil	6,10E-08	kg
Water, decarbonised, at user	2,65E-05	kg
Hydrogen, liquid	7,29E-11	kg
Spent anion exchange resin from potable water production	-3,85E-07	kg
Chemical, inorganic	2,06E-07	kg
Waste mineral oil	-1,59E-08	kg
<i>Electricity/heat</i>		
Consumo de red Chile	5,64E-04	kWh
<i>Emissions to air</i>		
Ethanol	8,62E-09	kg
Water/m3	1,03E-08	m3
Thorium-234	1,92E-09	kBq
Uranium alpha	3,85E-10	kBq

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

HWR CA	Cantidad	Unidad
Hydrogen fluoride	2,45E-13	kg
Ethane, 1,1,1,2-tetrafluoro-, HFC-134a	1,72E-09	kg
<i>Emissions to water</i>		
Aluminium	7,29E-09	kg
Fluoride	7,29E-10	kg
Copper	8,62E-12	kg
Zinc	2,52E-10	kg
Thorium-234	2,06E-08	kBq
Water, CL	1,62E-08	m3
Phosphate	2,25E-09	kg
Hydrocarbons, unspecified	4,05E-10	kg
Uranium alpha	5,44E-11	kBq
Nitrate	1,66E-08	kg
Chromium	2,52E-11	kg
Operación Planta y gestión de los residuos		
<i>Resources</i>		
Water, cooling, unspecified natural origin	1,13E-03	m3
<i>Materials/fuels</i>		
Waste mineral oil	-4,50E-07	kg
Hazardous waste, for incineration	-1,00E-06	kg
Fly ash and scrubber sludge	1,21E-05	kg
Argon, liquid	4,26E-07	kg
Cement, Portland	7,75E-08	kg
Carbon dioxide, liquid	8,03E-06	kg
Sodium hypochlorite, without water, in 15% solution state	7,42E-07	kg
Steel, low-alloyed, hot rolled	5,98E-08	kg
Cast iron	1,09E-06	kg
Chemical, inorganic	2,86E-05	kg
Nitrogen, liquid	4,52E-09	kg
Concrete, normal	1,67E-08	m3
Acetylene	2,98E-08	kg
Anionic resin	7,75E-06	kg
Oxygen, liquid	2,03E-06	kg
Flat glass, coated	6,40E-07	kg

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

HWR CA	Cantidad	Unidad
Chemical, organic	1,32E+00	kg
Water, decarbonised, at user	4,78E-06	kg
Hydrogen, liquid	7,52E-07	kg
Lubricating oil	2,98E-07	kg
Paper, woodfree, coated	3,58E-07	kg
Pitch	2,98E-08	kg
Cationic resin	2,98E-08	kg
Boric acid, anhydrous, powder	2,18E-07	kg
Reinforcing steel	-1,80E-09	kg
Low level radioactive waste	-4,50E-07	m3
<i>Electricity/heat</i>		
Diesel, burned in diesel-electric generating set	1,72E-04	MJ
<i>Emissions to air</i>		
Xenon-133	2,80E-01	kBq
Iodine-133	8,44E-07	kBq
Barium-140	1,47E-10	kBq
Antimony-125	1,09E-08	kBq
Radioactive species, other beta emitters	4,02E-08	kBq
Cesium-137	3,38E-10	kBq
Antimony-124	2,20E-10	kBq
Krypton-85m	4,57E-03	kBq
Xenon-135	7,70E-03	kBq
Iodine-131	1,57E-06	kBq
Cobalt-58	7,61E-09	kBq
Silver-110	1,45E-09	kBq
Aerosols, radioactive, unspecified	2,49E-09	kBq
Zirconium-95	2,68E-08	kBq
Noble gases, radioactive, unspecified	1,20E-01	kBq
Niobium-95	5,20E-11	kBq
Carbon-14	3,54E-02	kBq
Cobalt-60	3,51E-08	kBq
<i>Emissions to water</i>		
Hydrogen-3, Tritium	8,63E-01	kBq
Radioactive species, alpha emitters	1,40E-08	kBq

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

HWR CA	Cantidad	Unidad
Cerium-141	8,16E-08	kBq
Molybdenum-99	2,78E-09	kBq
Silver-110	2,06E-06	kBq
Iodine-131	3,81E-06	kBq
Cobalt-57	4,14E-06	kBq
Lanthanum-140	2,30E-07	kBq
Tellurium-123m	7,28E-07	kBq
Tellurium-132	3,91E-08	kBq
Cesium-134	1,75E-06	kBq
Zirconium-95	6,96E-07	kBq
Ruthenium-103	1,32E-07	kBq
Antimony-125	1,93E-05	kBq
Manganese-54	6,08E-06	kBq
Strontium-89	1,69E-06	kBq
Zinc-65	1,22E-07	kBq
Antimony-122	4,19E-07	kBq
Antimony-124	1,92E-05	kBq
Technetium-99m	1,30E-06	kBq
Strontium-90	6,03E-07	kBq
Cesium-136	1,30E-07	kBq
Iodine-133	1,93E-07	kBq
Sodium-24	4,63E-06	kBq
Cerium-144	2,24E-07	kBq
Chromium-51	3,51E-06	kBq
Iron-59	1,95E-07	kBq
Cobalt-60	1,83E-04	kBq
Niobium-95	1,42E-06	kBq
Cesium-137	4,64E-05	kBq
Cobalt-58	5,29E-04	kBq
Construcción y Desmantelamiento		
<i>Materials/fuels</i>		
Aluminium, primary, ingot	4,86E-07	kg
Chromium steel pipe	8,81E-06	kg
Copper	2,50E-06	kg
Inert waste, for final disposal	2,88E-03	kg
Drawing of pipe, steel	3,25E-06	kg

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

HWR CA	Cantidad	Unidad
Hot rolling, steel	1,59E-05	kg
Polycarbonate	1,29E-07	kg
Polyester resin, unsaturated	3,18E-08	kg
Polyethylene, high density, granulate	6,40E-07	kg
Polymethyl methacrylate, beads	7,35E-07	kg
Polyvinylchloride, emulsion polymerised	6,47E-07	kg
Reinforcing steel	5,79E-05	kg
Sheet rolling, aluminium	4,86E-07	kg
Sheet rolling, chromium steel	4,09E-06	kg
Sheet rolling, steel	2,38E-06	kg
Steel, low-alloyed	3,30E-06	kg
Synthetic rubber	1,52E-07	kg
Tin	1,75E-07	kg
Wire drawing, copper	2,08E-06	kg
Transport, freight train	8,29E-05	tkm
Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5	8,56E-05	tkm
Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5	1,30E-04	tkm
Concrete, normal	1,78E-06	m3
Excavation, hydraulic digger	1,47E-06	m3
Excavation, skid-steer loader	1,47E-06	m3
Sawnwood, hardwood, raw, air / kiln dried	4,20E-11	m3
<i>Electricity/heat</i>		
Consumo de red Chile	4,04E-03	kWh
Construcción de almacenamiento Final de Baja Radiación		
<i>Resources</i>		
Transformation, to industrial area	1,65E-08	m2
Occupation, industrial area	4,62E-07	m2a
Transformation, from industrial area	1,65E-08	m2
Transformation, to unknown	1,65E-08	m2
Transformation, from unknown	1,65E-08	m2
<i>Materials/fuels</i>		
Inert waste, for final disposal	-1,52E-04	kg
Industrial machine, heavy, unspecified	8,12E-07	kg

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

HWR CA	Cantidad	Unidad
Reinforcing steel	8,47E-06	kg
Building, multi-storey	6,60E-08	m3
Concrete, normal	4,41E-08	m3
Wastewater, unpolluted	-5,58E-08	m3
<i>Electricity/heat</i>		
Consumo de red Chile	3,75E-05	kWh
Diesel, burned in building machine	7,61E-06	MJ
<i>Emissions to air</i>		
Methane, fossil	8,12E-07	kg
Construcción de almacenamiento Intermedio de Baja Radiación		
<i>Resources</i>		
Occupation, industrial area	2,48E-06	m2a
Transformation, from pasture and meadow	4,06E-08	m2
Transformation, to unknown	4,06E-08	m2
Transformation, from industrial area	4,06E-08	m2
Transformation, to industrial area	4,06E-08	m2
<i>Materials/fuels</i>		
Concrete, normal	2,11E-08	m3
Steel, low-alloyed, hot rolled	5,71E-07	kg
Waste reinforced concrete	-5,33E-05	kg
Reinforcing steel	2,54E-06	kg
<i>Electricity/heat</i>		
Consumo de red Chile	4,26E-07	kWh
Diesel, burned in building machine	9,67E-06	MJ
Construcción de almacenamiento Final de Alta Radiación		
<i>Resources</i>		
Transformation, from industrial area	2,18E-09	m2
Transformation, to industrial area	2,18E-09	m2
Transformation, from unknown	2,18E-09	m2
Occupation, industrial area	4,49E-08	m2a
Transformation, to unknown	2,18E-09	m2

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

HWR CA	Cantidad	Unidad
<i>Materials/fuels</i>		
Concrete, normal	1,03E-08	m3
Reinforcing steel	1,97E-06	kg
Inert waste, for final disposal	-7,59E-05	kg
Building, multi-storey	8,73E-09	m3
Industrial machine, heavy, unspecified	2,82E-07	kg
<i>Electricity/heat</i>		
Diesel, burned in building machine	3,49E-07	MJ
Consumo de red Chile	4,35E-06	kWh
Construcción de almacenamiento Intermedio de Alta Radiación		
<i>Resources</i>		
Transformation, to industrial area	1,07E-09	m2
Occupation, industrial area	6,56E-08	m2a
Transformation, to unknown	1,07E-09	m2
Transformation, from pasture and meadow	1,07E-09	m2
Transformation, from industrial area	1,07E-09	m2
<i>Materials/fuels</i>		
Steel, low-alloyed, hot rolled	1,51E-08	kg
Concrete, normal	5,58E-10	m3
Waste reinforced concrete	-1,41E-06	kg
Reinforcing steel	6,72E-08	kg
<i>Electricity/heat</i>		
Diesel, burned in building machine	2,56E-07	MJ
Consumo de red Chile	1,13E-08	kWh

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

LWR CA	Cantidad	Unidades
Minería y fabricación de concentrados		
<i>Resources</i>		
Transformation, to unknown	2,99E-04	m2
Water, cooling, unspecified natural origin	9,87E-03	m3
Uranium	1,73E-03	kg
Occupation, mineral extraction site	6,58E-03	m2a
Transformation, to mineral extraction site	2,99E-04	m2
Transformation, from unknown	2,99E-04	m2
Transformation, from industrial area	2,99E-04	m2
<i>Materials/fuels</i>		
Mine infrastructure, open cast, uranium	1,02E-10	p
Blasting	4,28E-04	kg
<i>Electricity/heat</i>		
Diesel, burned in building machine	2,63E-02	MJ
Diesel, burned in diesel-electric generating set	6,01E-02	MJ
<i>Emissions to air</i>		
Water/m3	1,48E-03	m3
Radon-222	2,14E+02	kBq
Particulates, > 10 um	9,21E-05	kg
Uranium alpha	1,55E-04	kBq
<i>Emissions to water</i>		
Molybdenum	2,63E-06	kg
Aluminium	5,10E-06	kg
Manganese	1,14E-04	kg
Lead	2,96E-05	kg
Selenium	3,13E-07	kg
Water, CL	8,39E-03	m3
Ammonium, ion	1,40E-05	kg
Chloride	1,41E-03	kg
Radium-226	8,23E+00	kBq
Vanadium	1,07E-05	kg
Cadmium	1,53E-07	kg

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

LWR CA	Cantidad	Unidades
Suspended solids, unspecified	3,46E-03	kg
Nitrate	3,46E-06	kg
Uranium alpha	3,62E-01	kBq
Barium	3,13E-06	kg
Iron	5,59E-05	kg
Thorium-230	7,57E-01	kBq
Zinc	1,97E-06	kg
Sulfate	7,90E-02	kg
Magnesium	1,81E-04	kg
Arsenic	1,53E-07	kg
Conversión		
<i>Materials/fuels</i>		
Ammonia, liquid	9,87E-06	kg
Water, decarbonised, at user	1,97E-02	kg
Uranium conversion facility	1,24E-13	p
Average incineration residue	-6,71E-06	kg
Low level radioactive waste	-2,41E-08	m3
Chemical, inorganic	2,05E-06	kg
Chemical, organic	1,18E-06	kg
Hydrogen fluoride	2,33E-05	kg
Nitric acid, without water, in 50% solution state	3,55E-05	kg
Quicklime, milled, loose	1,97E-05	kg
Cement, unspecified	3,20E-05	kg
	0,00E+00	
<i>Electricity/heat</i>	0,00E+00	
Consumo eléctrico Chile	4,06E-04	kWh
Heat, district or industrial, natural gas	1,48E-04	MJ
Heat, district or industrial, natural gas	2,61E-02	MJ
	0,00E+00	
<i>Emissions to air</i>	0,00E+00	
Uranium-235	5,13E-07	kBq
Hexane	7,50E-07	kg
Carbon monoxide, fossil	2,72E-08	kg
Protactinium-234	1,07E-05	kBq
Hydrogen fluoride	1,07E-08	kg
Particulates, > 2.5 um, and < 10um	2,88E-08	kg

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

LWR CA	Cantidad	Unidades
Water/m3	7,65E-06	m3
Sulfur dioxide	2,17E-07	kg
NM VOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin	4,74E-09	kg
Nitrogen oxides	9,87E-07	kg
Thorium-230	8,68E-09	kBq
Thorium-234	1,07E-05	kBq
Uranium-238	1,07E-05	kBq
Uranium-234	9,87E-06	kBq
Radium-226	1,46E-09	kBq
<i>Emissions to water</i>		
Sodium	2,41E-07	kg
Uranium-234	2,13E-04	kBq
Calcium	3,28E-07	kg
Tin	2,72E-10	kg
Cadmium	6,71E-11	kg
Copper	6,31E-10	kg
Suspended solids, unspecified	1,38E-07	kg
Manganese	8,68E-09	kg
Aluminium	2,72E-09	kg
Uranium-235	7,89E-06	kBq
Barium	8,68E-10	kg
Lead	6,71E-11	kg
Nitrate	2,41E-08	kg
Fluoride	1,07E-08	kg
BOD5, Biological Oxygen Demand	1,38E-08	kg
Water, RoW	1,21E-05	m3
COD, Chemical Oxygen Demand	6,71E-08	kg
Sulfate	1,10E-07	kg
Chromium	3,95E-10	kg
TOC, Total Organic Carbon	6,71E-09	kg
Ammonium, ion	6,71E-09	kg
Potassium	6,71E-09	kg
Mercury	6,71E-12	kg
Magnesium	1,38E-08	kg
Uranium-238	2,13E-04	kBq
Radium-226	5,52E-08	kBq

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

LWR CA	Cantidad	Unidades
Thorium-230	4,74E-08	kBq
Iron	6,71E-09	kg
Thorium-234	1,97E-04	kBq
Protactinium-234	1,97E-04	kBq
Titanium	6,71E-11	kg
Zinc	2,72E-10	kg
DOC, Dissolved Organic Carbon	6,71E-09	kg
Sulfide	6,71E-10	kg
Chloride	3,43E-07	kg
Phosphate	2,05E-09	kg
<i>Fabricación del combustible</i>		
<i>Materials/fuels</i>		
Methanol	1,86E-09	kg
Soap	5,23E-09	kg
Brass	1,05E-08	kg
Steel, low-alloyed, hot rolled	8,72E-07	kg
Low level radioactive waste	-1,83E-09	m3
Municipal solid waste	-1,37E-06	kg
Aluminium, wrought alloy	2,91E-07	kg
Acetylene	1,45E-10	kg
Hydrogen peroxide, without water, in 50% solution state	4,07E-09	kg
Polyvinylchloride, bulk polymerised	4,94E-09	kg
Argon, liquid	1,05E-08	kg
Hydrochloric acid, without water, in 30% solution state	1,16E-09	kg
Concrete, normal	1,69E-09	m3
Nitric acid, without water, in 50% solution state	8,72E-09	kg
Sodium hydroxide, without water, in 50% solution state	1,63E-08	kg
Chemical, organic	4,77E-09	kg
Uranium enrichment centrifuge facility	6,45E-14	p
Phosphoric acid, fertiliser grade, without water, in 70% solution state	6,98E-10	kg
Nitrogen, liquid	2,27E-09	kg
Oxygen, liquid	2,09E-10	kg
Lubricating oil	5,35E-08	kg
Water, decarbonised, at user	2,33E-05	kg
Hydrogen, liquid {GLO} market for Alloc Def, U	6,40E-11	kg
Spent anion exchange resin from potable water production	-3,37E-07	kg

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

LWR CA	Cantidad	Unidades
Chemical, inorganic	1,81E-07	kg
Waste mineral oil	-1,40E-08	kg
<i>Electricity/heat</i>		
Consumo eléctrico Chile	4,94E-04	kWh
<i>Emissions to air</i>		
Ethanol	7,56E-09	kg
Water/m3	9,01E-09	m3
Thorium-234	1,69E-09	kBq
Uranium alpha	3,37E-10	kBq
Hydrogen fluoride	2,15E-13	kg
Ethane, 1,1,1,2-tetrafluoro-, HFC-134a	1,51E-09	kg
<i>Emissions to water</i>		
Aluminium	6,40E-09	kg
Fluoride	6,40E-10	kg
Copper	7,56E-12	kg
Zinc	2,21E-10	kg
Thorium-234	1,80E-08	kBq
Water, CL	1,42E-08	m3
Phosphate	1,98E-09	kg
Hydrocarbons, unspecified	3,55E-10	kg
Uranium alpha	4,77E-11	kBq
Nitrate	1,45E-08	kg
Chromium	2,21E-11	kg
Operación Planta y gestión de los residuos		
Resources		
Water, cooling, unspecified natural origin	2,43E-03	m3
<i>Materials/fuels</i>		
Waste mineral oil	-1,63E-06	kg
Hazardous waste, for incineration	-9,70E-07	kg
Fly ash and scrubber sludge	-2,19E-06	kg
Argon, liquid	2,61E-05	kg
Cement, Portland	9,19E-07	kg

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

LWR CA	Cantidad	Unidades
Carbon dioxide, liquid	1,67E-07	kg
Sodium hypochlorite, without water, in 15% solution state	1,73E-05	kg
Steel, low-alloyed, hot rolled	1,60E-06	kg
Cast iron	1,29E-07	kg
Chemical, inorganic	2,34E-06	kg
Nitrogen, liquid	6,17E-05	kg
Concrete, normal	9,74E-09	m3
Acetylene	3,60E-08	kg
Anionic resin	6,43E-08	kg
Oxygen, liquid	1,67E-05	kg
Flat glass, coated	4,37E-06	kg
Chemical, organic	1,38E-06	kg
Water, decarbonised, at user	2,84E+00	kg
Hydrogen, liquid	1,03E-05	kg
Lubricating oil	1,62E-06	kg
Paper, woodfree, coated	6,43E-07	kg
Pitch	7,71E-07	kg
Cationic resin	6,43E-08	kg
Boric acid, anhydrous, powder	6,43E-08	kg
Reinforcing steel	4,70E-07	kg
Low level radioactive waste	-1,84E-9	m3
<i>Electricity/heat</i>		
Diesel, burned in diesel-electric generating set	3,70E-04	MJ
<i>Emissions to air</i>		
Xenon-133	6,04E-01	kBq
Iodine-133	1,82E-06	kBq
Barium-140	3,17E-10	kBq
Antimony-125	2,34E-08	kBq
Radioactive species, other beta emitters	8,67E-08	kBq
Cesium-137	7,28E-09	kBq
Antimony-124	4,75E-10	kBq
Krypton-85m	9,87E-03	kBq
Xenon-135	1,66E-01	kBq
Iodine-131	3,38E-06	kBq
Cobalt-58	1,64E-08	kBq

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

LWR CA	Cantidad	Unidades
Silver-110	3,13E-09	kBq
Aerosols, radioactive, unspecified	5,37E-09	kBq
Zirconium-95	5,78E-08	kBq
Noble gases, radioactive, unspecified	2,59E-01	kBq
Niobium-95	1,12E-10	kBq
Carbon-14	7,64E-03	kBq
Cobalt-60	7,57E-08	kBq
<i>Emissions to water</i>		
Hydrogen-3, Tritium	1,86E+00	kBq
Radioactive species, alpha emitters	3,02E-08	kBq
Cerium-141	1,76E-07	kBq
Molybdenum-99	6,00E-09	kBq
Silver-110	4,43E-06	kBq
Iodine-131	8,21E-06	kBq
Cobalt-57	8,92E-06	kBq
Lanthanum-140	4,95E-07	kBq
Tellurium-123m	1,57E-06	kBq
Tellurium-132	8,42E-08	kBq
Cesium-134	3,77E-06	kBq
Zirconium-95	1,50E-06	kBq
Ruthenium-103	2,85E-07	kBq
Antimony-125	4,17E-05	kBq
Manganese-54	1,31E-05	kBq
Strontium-89	3,65E-06	kBq
Zinc-65	2,63E-07	kBq
Antimony-122	9,04E-07	kBq
Antimony-124	4,13E-05	kBq
Technetium-99m	2,81E-06	kBq
Strontium-90	1,30E-06	kBq
Cesium-136	2,81E-07	kBq
Iodine-133	4,16E-07	kBq
Sodium-24	9,98E-06	kBq
Cerium-144	4,82E-07	kBq
Chromium-51	7,56E-06	kBq
Iron-59	4,20E-07	kBq
Cobalt-60	3,95E-04	kBq

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

LWR CA	Cantidad	Unidades
Niobium-95	3,07E-06	kBq
Cesium-137	1,00E-04	kBq
Cobalt-58	1,14E-03	kBq
Construcción y Desmantelamiento		
<i>Resources</i>		
Occupation, industrial area	1,76E-05	m2a
Transformation, from pasture and meadow	4,41E-07	m2
Transformation, to industrial area	4,41E-07	m2
Transformation, to unknown	4,41E-07	m2
Occupation, construction site	6,62E-06	m2a
Transformation, from industrial area	4,41E-07	m2
<i>Materials/fuels</i>		
Steel, low-alloyed, hot rolled	1,64E-05	kg
Aluminium, wrought alloy	4,00E-07	kg
Fibre cement facing tile	1,56E-05	kg
Steel, chromium steel 18/8, hot rolled	6,44E-05	kg
Paper, woodfree, coated	2,50E-06	kg
Aluminium, cast alloy	1,88E-07	kg
Inert waste, for final disposal	-9,47E-04	kg
Plywood, for outdoor use	1,98E-08	m3
Lubricating oil	5,88E-07	kg
Concrete, normal	4,97E-07	m3
Excavation, hydraulic digger	2,50E-07	m3
Reinforcing steel	9,91E-05	kg
Copper	4,32E-06	kg
<i>Electricity/heat</i>		
Diesel, burned in building machine	5,59E-04	MJ
Consumo eléctrico Chile	1,56E-03	kWh
Heat, district or industrial, other than natural gas	4,00E-04	MJ
Construcción del almacenamiento Final de Alta Radiación		
<i>Resources</i>		
Transformation, from industrial area	5,85E-10	m2
Transformation, to industrial area	5,85E-10	m2

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

LWR CA	Cantidad	Unidades
Transformation, from unknown	5,85E-10	m2
Occupation, industrial area	1,20E-08	m2a
Transformation, to unknown	5,85E-10	m2
<i>Materials/fuels</i>		
Concrete, normal	2,75E-09	m3
Reinforcing steel	5,29E-07	kg
Inert waste, for final disposal	-2,03E-05	kg
Building, multi-storey	2,34E-09	m3
Industrial machine, heavy, unspecified	7,56E-08	kg
<i>Electricity/heat</i>		
Diesel, burned in building machine	9,35E-08	MJ
Consumo eléctrico Chile	1,16E-06	kWh
Construcción del almacenamiento Final de Baja Radiación		
<i>Resources</i>		
Transformation, to industrial area	9,56E-09	m2
Occupation, industrial area	2,68E-07	m2a
Transformation, from industrial area	9,56E-09	m2
Transformation, to unknown	9,56E-09	m2
Transformation, from unknown	9,56E-09	m2
<i>Materials/fuels</i>		
Inert waste, for final disposal	-8,82E-05	kg
Industrial machine, heavy, unspecified	4,70E-07	kg
Reinforcing steel	4,91E-06	kg
Building, multi-storey	3,82E-08	m3
Concrete, normal	2,56E-08	m3
Wastewater, unpolluted	-3,23E-08	m3
<i>Electricity/heat</i>		
Consumo eléctrico Chile	2,17E-05	kWh
Diesel, burned in building machine	4,41E-06	MJ
<i>Emissions to air</i>		
Methane, fossil	4,70E-07	kg

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

LWR CA	Cantidad	Unidades
Construcción del almacenamiento Intermedio de Alta Radiación		
<i>Resources</i>		
Transformation, from industrial area	3,12E-09	m2
Transformation, to industrial area	3,12E-09	m2
Transformation, from unknown	3,12E-09	m2
Occupation, industrial area	6,41E-08	m2a
Transformation, to unknown	3,12E-09	m2
<i>Materials/fuels</i>		
Concrete, normal	1,47E-08	m3
Reinforcing steel	2,82E-06	kg
Inert waste, for final disposal	-1,08E-04	kg
Building, multi-storey	1,25E-08	m3
Industrial machine, heavy, unspecified	4,03E-07	kg
<i>Electricity/heat</i>		
<i>Diesel, burned in building machine</i>	4,99E-07	MJ
<i>Consumo eléctrico Chile</i>	6,20E-06	kWh
Construcción del almacenamiento Intermedio de Baja Radiación		
<i>Resources</i>		
Occupation, industrial area	1,43E-06	m2a
Transformation, from pasture and meadow	2,35E-08	m2
Transformation, to unknown	2,35E-08	m2
Transformation, from industrial area	2,35E-08	m2
Transformation, to industrial area	2,35E-08	m2
<i>Materials/fuels</i>		
Concrete, normal	1,22E-08	m3
Steel, low-alloyed, hot rolled	3,31E-07	kg
Waste reinforced concrete	-3,09E-05	kg
Reinforcing steel	1,47E-06	kg
<i>Electricity/heat</i>		
<i>Consumo eléctrico Chile</i>	2,47E-07	kWh
<i>Diesel, burned in building machine</i>	5,60E-06	MJ

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

LWR CC	Cantidad	Unidades
Minería y fabricación de Concentrados		
<i>Resources</i>		
Transformation, to unknown	2,25E-04	m2
Water, cooling, unspecified natural origin	7,40E-03	m3
Uranium	1,30E-03	kg
Occupation, mineral extraction site	4,94E-03	m2a
Transformation, to mineral extraction site	2,25E-04	m2
Transformation, from unknown	2,25E-04	m2
Transformation, from industrial area	2,25E-04	m2
<i>Materials/fuels</i>		
Mine infrastructure, open cast, uranium	7,61E-11	p
Blasting	3,21E-04	kg
<i>Electricity/heat</i>		
Diesel, burned in building machine	1,97E-02	MJ
Diesel, burned in diesel-electric generating set	4,50E-02	MJ
<i>Emissions to air</i>		
Water/m3	1,11E-03	m3
Radon-222	1,60E+02	kBq
Particulates, > 10 um	6,91E-05	kg
Uranium alpha	1,16E-04	kBq
	0,00E+00	
<i>Emissions to water</i>	0,00E+00	
Molybdenum	1,97E-06	kg
Aluminium	3,83E-06	kg
Manganese	8,51E-05	kg
Lead	2,22E-05	kg
Selenium	2,34E-07	kg
Water, CL	6,29E-03	m3
Ammonium, ion	1,05E-05	kg
Chloride	1,06E-03	kg
Radium-226	6,17E+00	kBq
Vanadium	8,02E-06	kg
Cadmium	1,15E-07	kg

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

LWR CC	Cantidad	Unidades
Suspended solids, unspecified	2,59E-03	kg
Nitrate	2,59E-06	kg
Uranium alpha	2,71E-01	kBq
Barium	2,34E-06	kg
Iron	4,20E-05	kg
Thorium-230	5,68E-01	kBq
Zinc	1,48E-06	kg
Sulfate	5,92E-02	kg
Magnesium	1,36E-04	kg
Arsenic	1,15E-07	kg
Conversión		
<i>Materials/fuels</i>		
Ammonia, liquid	7,40E-06	kg
Water, decarbonised, at user	1,48E-02	kg
Uranium conversion facility	9,26E-14	p
Average incineration residue	-5,03E-06	kg
Low level radioactive waste	-1,81E-08	m3
Chemical, inorganic	1,54E-06	kg
Chemical, organic	8,88E-07	kg
Hydrogen fluoride	1,75E-05	kg
Nitric acid, without water, in 50% solution state	2,66E-05	kg
Quicklime, milled, loose	1,48E-05	kg
Cement, unspecified	2,40E-05	kg
<i>Electricity/heat</i>		
Consumo eléctrico Chile	3,05E-04	kWh
Heat, district or industrial, natural gas	1,11E-04	MJ
Heat, district or industrial, natural gas	1,96E-02	MJ
<i>Emissions to air</i>		
Uranium-235	3,85E-07	kBq
Hexane	5,62E-07	kg
Carbon monoxide, fossil	2,04E-08	kg
Protactinium-234	7,99E-06	kBq
Hydrogen fluoride	7,99E-09	kg
Particulates, > 2.5 um, and < 10um	2,16E-08	kg

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

LWR CC	Cantidad	Unidades
Water/m3	5,73E-06	m3
Sulfur dioxide	1,63E-07	kg
NM VOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin	3,55E-09	kg
Nitrogen oxides	7,40E-07	kg
Thorium-230	6,51E-09	kBq
Thorium-234	7,99E-06	kBq
Uranium-238	7,99E-06	kBq
Uranium-234	7,40E-06	kBq
Radium-226	1,10E-09	kBq
	0,00E+00	
<i>Emissions to water</i>	0,00E+00	
Sodium	1,81E-07	kg
Uranium-234	1,60E-04	kBq
Calcium	2,46E-07	kg
Tin	2,04E-10	kg
Cadmium	5,03E-11	kg
Copper	4,74E-10	kg
Suspended solids, unspecified	1,04E-07	kg
Manganese	6,51E-09	kg
Aluminium	2,04E-09	kg
Uranium-235	5,92E-06	kBq
Barium	6,51E-10	kg
Lead	5,03E-11	kg
Nitrate	1,81E-08	kg
Fluoride	7,99E-09	kg
BOD5, Biological Oxygen Demand	1,04E-08	kg
Water, RoW	9,06E-06	m3
COD, Chemical Oxygen Demand	5,03E-08	kg
Sulfate	8,29E-08	kg
Chromium	2,96E-10	kg
TOC, Total Organic Carbon	5,03E-09	kg
Ammonium, ion	5,03E-09	kg
Potassium	5,03E-09	kg
Mercury	5,03E-12	kg
Magnesium	1,04E-08	kg
Uranium-238	1,60E-04	kBq
Radium-226	4,14E-08	kBq

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

LWR CC	Cantidad	Unidades
Thorium-230	3,55E-08	kBq
Iron	5,03E-09	kg
Thorium-234	1,48E-04	kBq
Protactinium-234	1,48E-04	kBq
Titanium	5,03E-11	kg
Zinc	2,04E-10	kg
DOC, Dissolved Organic Carbon	5,03E-09	kg
Sulfide	5,03E-10	kg
Chloride	2,57E-07	kg
Phosphate	1,54E-09	kg
Fabricación de combustible		
<i>Materials/fuels</i>		
Methanol	1,40E-09	kg
Soap	3,93E-09	kg
Brass	7,85E-09	kg
Steel, low-alloyed, hot rolled	6,54E-07	kg
Low level radioactive waste	-1,37E-09	m3
Municipal solid waste	-1,02E-06	kg
Aluminium, wrought alloy	2,18E-07	kg
Acetylene	1,09E-10	kg
Hydrogen peroxide, without water, in 50% solution state	3,05E-09	kg
Polyvinylchloride, bulk polymerised	3,71E-09	kg
Argon, liquid	7,85E-09	kg
Hydrochloric acid, without water, in 30% solution state	8,72E-10	kg
Concrete, normal	1,26E-09	m3
Nitric acid, without water, in 50% solution state	6,54E-09	kg
Sodium hydroxide, without water, in 50% solution state	1,22E-08	kg
Chemical, organic	3,58E-09	kg
Uranium enrichment centrifuge facility	4,84E-14	p
Phosphoric acid, fertiliser grade, without water, in 70% solution state	5,23E-10	kg
Nitrogen, liquid	1,70E-09	kg
Oxygen, liquid	1,57E-10	kg
Lubricating oil	4,01E-08	kg
Water, decarbonised, at user	1,74E-05	kg
Hydrogen, liquid	4,80E-11	kg
Spent anion exchange resin from potable water production	-2,53E-07	kg

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

LWR CC	Cantidad	Unidades
Chemical, inorganic	1,36E-07	kg
Waste mineral oil	-1,05E-08	kg
<i>Electricity/heat</i>		
Consumo eléctrico Chile	3,71E-04	kWh
<i>Emissions to air</i>		
Ethanol	5,67E-09	kg
Water/m3	6,76E-09	m3
Thorium-234	1,26E-09	kBq
Uranium alpha	2,53E-10	kBq
Hydrogen fluoride	1,61E-13	kg
Ethane, 1,1,1,2-tetrafluoro-, HFC-134a	1,13E-09	kg
<i>Emissions to water</i>		
Aluminium	4,80E-09	kg
Fluoride	4,80E-10	kg
Copper	5,67E-12	kg
Zinc	1,66E-10	kg
Thorium-234	1,35E-08	kBq
Water	1,07E-08	m3
Phosphate	1,48E-09	kg
Hydrocarbons, unspecified	2,66E-10	kg
Uranium alpha	3,58E-11	kBq
Nitrate	1,09E-08	kg
Chromium	1,66E-11	kg
Operación Planta y gestión de los residuos		
<i>Resources</i>		
Water, cooling, unspecified natural origin	2,43E-03	m3
<i>Materials/fuels</i>		
Waste mineral oil	-1,63E-06	kg
Hazardous waste, for incineration	-9,70E-07	kg
Fly ash and scrubber sludge	-2,19E-06	kg
Argon, liquid	2,61E-05	kg
Cement, Portland	9,19E-07	kg

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

LWR CC	Cantidad	Unidades
Carbon dioxide, liquid	1,67E-07	kg
Sodium hypochlorite, without water, in 15% solution state	1,73E-05	kg
Steel, low-alloyed, hot rolled	1,60E-06	kg
Cast iron	1,29E-07	kg
Chemical, inorganic	2,34E-06	kg
Nitrogen, liquid	6,17E-05	kg
Concrete, normal	9,74E-09	m3
Acetylene	3,60E-08	kg
Anionic resin	6,43E-08	kg
Oxygen, liquid	1,67E-05	kg
Flat glass, coated	4,37E-06	kg
Chemical, organic	1,38E-06	kg
Water, decarbonised, at user	2,84E+00	kg
Hydrogen, liquid	1,03E-05	kg
Lubricating oil	1,62E-06	kg
Paper, woodfree, coated	6,43E-07	kg
Pitch	7,71E-07	kg
Cationic resin	6,43E-08	kg
Boric acid, anhydrous, powder	6,43E-08	kg
Reinforcing steel	4,70E-07	kg
Low level radioactive waste	-1,84E-9	m3
<i>Electricity/heat</i>		
Diesel, burned in diesel-electric generating set	3,70E-04	MJ
<i>Emissions to air</i>		
Xenon-133	6,04E-01	kBq
Iodine-133	1,82E-06	kBq
Barium-140	3,17E-10	kBq
Antimony-125	2,34E-08	kBq
Radioactive species, other beta emitters	8,67E-08	kBq
Cesium-137	7,28E-09	kBq
Antimony-124	4,75E-10	kBq
Krypton-85m	9,87E-03	kBq
Xenon-135	1,66E-01	kBq
Iodine-131	3,38E-06	kBq
Cobalt-58	1,64E-08	kBq

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

LWR CC	Cantidad	Unidades
Silver-110	3,13E-09	kBq
Aerosols, radioactive, unspecified	5,37E-09	kBq
Zirconium-95	5,78E-08	kBq
Noble gases, radioactive, unspecified	2,59E-01	kBq
Niobium-95	1,12E-10	kBq
Carbon-14	7,64E-03	kBq
Cobalt-60	7,57E-08	kBq
Emissions to water		
Hydrogen-3, Tritium	1,86E+00	kBq
Radioactive species, alpha emitters	3,02E-08	kBq
Cerium-141	1,76E-07	kBq
Molybdenum-99	6,00E-09	kBq
Silver-110	4,43E-06	kBq
Iodine-131	8,21E-06	kBq
Cobalt-57	8,92E-06	kBq
Lanthanum-140	4,95E-07	kBq
Tellurium-123m	1,57E-06	kBq
Tellurium-132	8,42E-08	kBq
Cesium-134	3,77E-06	kBq
Zirconium-95	1,50E-06	kBq
Ruthenium-103	2,85E-07	kBq
Antimony-125	4,17E-05	kBq
Manganese-54	1,31E-05	kBq
Strontium-89	3,65E-06	kBq
Zinc-65	2,63E-07	kBq
Antimony-122	9,04E-07	kBq
Antimony-124	4,13E-05	kBq
Technetium-99m	2,81E-06	kBq
Strontium-90	1,30E-06	kBq
Cesium-136	2,81E-07	kBq
Iodine-133	4,16E-07	kBq
Sodium-24	9,98E-06	kBq
Cerium-144	4,82E-07	kBq
Chromium-51	7,56E-06	kBq
Iron-59	4,20E-07	kBq
Cobalt-60	3,95E-04	kBq
Niobium-95	3,07E-06	kBq

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

LWR CC	Cantidad	Unidades
Cesium-137	1,00E-04	kBq
Cobalt-58	1,14E-03	kBq
Construcción y Desmantelamiento		
<i>Resources</i>		
Occupation, industrial area	1,76E-05	m2a
Transformation, from pasture and meadow	4,41E-07	m2
Transformation, to industrial area	4,41E-07	m2
Transformation, to unknown	4,41E-07	m2
Occupation, construction site	6,62E-06	m2a
Transformation, from industrial area	4,41E-07	m2
<i>Materials/fuels</i>		
Steel, low-alloyed, hot rolled	1,64E-05	kg
Aluminium, wrought alloy	4,00E-07	kg
Fibre cement facing tile	1,56E-05	kg
Steel, chromium steel 18/8, hot rolled	6,44E-05	kg
Paper, woodfree, coated	2,50E-06	kg
Aluminium, cast alloy	1,88E-07	kg
Inert waste, for final disposal	-9,47E-04	kg
Plywood, for outdoor use	1,98E-08	m3
Lubricating oil	5,88E-07	kg
Concrete, normal	4,97E-07	m3
Excavation, hydraulic digger	2,50E-07	m3
Reinforcing steel	9,91E-05	kg
Copper	4,32E-06	kg
<i>Electricity/heat</i>		
Diesel, burned in building machine	5,59E-04	MJ
Consumo eléctrico Chile	1,56E-03	kWh
Heat, district or industrial, other than natural gas	4,00E-04	MJ
Construcción de almacenamiento Final de Baja Radiación		
<i>Resources</i>		
Transformation, to industrial area	9,56E-09	m2
Occupation, industrial area	2,68E-07	m2a
Transformation, from industrial area	9,56E-09	m2

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

LWR CC	Cantidad	Unidades
Transformation, to unknown	9,56E-09	m2
Transformation, from unknown	9,56E-09	m2
<i>Materials/fuels</i>		
Inert waste, for final disposal	-8,82E-05	kg
Industrial machine, heavy, unspecified	4,71E-07	kg
Reinforcing steel	4,91E-06	kg
Building, multi-storey	3,82E-08	m3
Concrete, normal	2,56E-08	m3
Wastewater, unpolluted	-3,24E-08	m3
<i>Electricity/heat</i>		
Consumo eléctrico Chile	2,17E-05	kWh
Diesel, burned in building machine	4,41E-06	MJ
<i>Emissions to air</i>		
Methane, fossil	4,71E-07	kg
Construcción de almacenamiento Intermedio de Baja Radiación		
<i>Resources</i>		
Occupation, industrial area	1,44E-06	m2a
Transformation, from pasture and meadow	2,35E-08	m2
Transformation, to unknown	2,35E-08	m2
Transformation, from industrial area	2,35E-08	m2
Transformation, to industrial area	2,35E-08	m2
<i>Materials/fuels</i>		
Concrete, normal	1,22E-08	m3
Steel, low-alloyed, hot rolled	3,31E-07	kg
Waste reinforced concrete	-3,09E-05	kg
Reinforcing steel	1,47E-06	kg
<i>Electricity/heat</i>		
Consumo eléctrico Chile	2,47E-07	kWh
Diesel, burned in building machine	5,60E-06	MJ

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

SMR CA	Cantidad	Unidades
Minería y fabricación de concentrados		
<i>Resources</i>		
Transformation, to unknown	3,74E-04	m2
Water, cooling, unspecified natural origin, CL	1,23E-02	m3
Uranium	2,16E-03	kg
Occupation, mineral extraction site	8,22E-03	m2a
Transformation, to mineral extraction site	3,74E-04	m2
Transformation, from unknown	3,74E-04	m2
Transformation, from industrial area	3,74E-04	m2
<i>Materials/fuels</i>		
Mine infrastructure, open cast, uranium	1,27E-10	p
Blasting	5,34E-04	kg
Electricity/heat		
Diesel, burned in building machine	3,29E-02	MJ
Diesel, burned in diesel-electric generating set	7,50E-02	MJ
<i>Emissions to air</i>		
Water/m3	1,85E-03	m3
Radon-222	2,67E+02	kBq
Particulates, > 10 um	1,15E-04	kg
Uranium alpha	1,93E-04	kBq
Emissions to water	0,00E+00	
Molybdenum	3,29E-06	kg
Aluminium	6,37E-06	kg
Manganese	1,42E-04	kg
Lead	3,70E-05	kg
Selenium	3,90E-07	kg
Water, CL	1,05E-02	m3
Ammonium, ion	1,75E-05	kg
Chloride	1,77E-03	kg
Radium-226	1,03E+01	kBq
Vanadium	1,34E-05	kg
Cadmium	1,91E-07	kg
Suspended solids, unspecified	4,31E-03	kg
Nitrate	4,31E-06	kg

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

SMR CA	Cantidad	Unidades
Uranium alpha	4,52E-01	kBq
Barium	3,90E-06	kg
Iron	6,98E-05	kg
Thorium-230	9,45E-01	kBq
Zinc	2,47E-06	kg
Sulfate	9,86E-02	kg
Magnesium	2,26E-04	kg
Arsenic	1,91E-07	kg
Conversión		
Resources		
<i>Materials/fuels</i>		
Ammonia, liquid	1,22E-05	kg
Water, decarbonised, at user	2,45E-02	kg
Uranium conversion facility	1,53E-13	p
Average incineration residue	-8,32E-06	kg
{GLO} market for Alloc Def, U	-2,99E-08	m3
Chemical, inorganic	2,55E-06	kg
Chemical, organic	1,47E-06	kg
Hydrogen fluoride	2,89E-05	kg
Nitric acid, without water, in 50% solution state	4,41E-05	kg
Quicklime, milled, loose	2,45E-05	kg
Cement, unspecified	3,96E-05	kg
<i>Electricity/heat</i>		
Consumo eléctrico Chile	5,04E-04	kWh
Heat, district or industrial, natural gas	1,84E-04	MJ
Heat, district or industrial, natural gas	3,24E-02	MJ
<i>Emissions to air</i>		
Uranium-235	6,36E-07	kBq
Hexane	9,30E-07	kg
Carbon monoxide, fossil	3,38E-08	kg
Protactinium-234	1,32E-05	kBq
Hydrogen fluoride	1,32E-08	kg
Particulates, > 2.5 um, and < 10um	3,57E-08	kg
Water/m3	9,48E-06	m3

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

SMR CA	Cantidad	Unidades
Sulfur dioxide	2,69E-07	kg
NM VOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin	5,87E-09	kg
Nitrogen oxides	1,22E-06	kg
Thorium-230	1,08E-08	kBq
Thorium-234	1,32E-05	kBq
Uranium-238	1,32E-05	kBq
Uranium-234	1,22E-05	kBq
Radium-226	1,81E-09	kBq
<i>Emissions to water</i>	0,00E+00	
Sodium	2,99E-07	kg
Uranium-234	2,64E-04	kBq
Calcium	4,06E-07	kg
Tin	3,38E-10	kg
Cadmium	8,32E-11	kg
Copper	7,83E-10	kg
Suspended solids, unspecified	1,71E-07	kg
Manganese	1,08E-08	kg
Aluminium	3,38E-09	kg
Uranium-235	9,79E-06	kBq
Barium	1,08E-09	kg
Lead	8,32E-11	kg
Nitrate	2,99E-08	kg
Fluoride	1,32E-08	kg
BOD5, Biological Oxygen Demand	1,71E-08	kg
Water	1,50E-05	m3
COD, Chemical Oxygen Demand	8,32E-08	kg
Sulfate	1,37E-07	kg
Chromium	4,89E-10	kg
TOC, Total Organic Carbon	8,32E-09	kg
Ammonium, ion	8,32E-09	kg
Potassium	8,32E-09	kg
Mercury	8,32E-12	kg
Magnesium	1,71E-08	kg
Uranium-238	2,64E-04	kBq
Radium-226	6,85E-08	kBq
Thorium-230	5,87E-08	kBq

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

SMR CA	Cantidad	Unidades
Iron	8,32E-09	kg
Thorium-234	2,45E-04	kBq
Protactinium-234	2,45E-04	kBq
Titanium	8,32E-11	kg
Zinc	3,38E-10	kg
DOC, Dissolved Organic Carbon	8,32E-09	kg
Sulfide	8,32E-10	kg
Chloride	4,26E-07	kg
Phosphate	2,55E-09	kg
Fabricación de combustible		
Resources		
Materials/fuels		
Methanol	2,12E-09	kg
Soap	5,97E-09	kg
Brass	1,19E-08	kg
Steel, low-alloyed, hot rolled	9,95E-07	kg
Low level radioactive waste	-2,09E-09	m3
Municipal solid waste	-1,56E-06	kg
Aluminium, wrought alloy	3,32E-07	kg
Acetylene	1,66E-10	kg
Hydrogen peroxide, without water, in 50% solution state	4,64E-09	kg
Polyvinylchloride, bulk polymerised	5,64E-09	kg
Argon, liquid	1,19E-08	kg
Hydrochloric acid, without water, in 30% solution state	1,33E-09	kg
Concrete, normal	1,92E-09	m3
Nitric acid, without water, in 50% solution state	9,95E-09	kg
Sodium hydroxide, without water, in 50% solution state	1,86E-08	kg
Chemical, organic	5,44E-09	kg
Uranium enrichment centrifuge facility	7,36E-14	p
Phosphoric acid, fertiliser grade, without water, in 70% solution state	7,96E-10	kg
Nitrogen, liquid	2,59E-09	kg
Oxygen, liquid	2,39E-10	kg
Lubricating oil	6,10E-08	kg
Water, decarbonised, at user	2,65E-05	kg
Hydrogen, liquid	7,29E-11	kg
Spent anion exchange resin from potable water production	-3,85E-07	kg

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

SMR CA	Cantidad	Unidades
Chemical, inorganic	2,06E-07	kg
Waste mineral oil	-1,59E-08	kg
<i>Electricity/heat</i>		
Consumo eléctrico Chile	5,64E-04	kWh
<i>Emissions to air</i>		
Ethanol	8,62E-09	kg
Water/m3	1,03E-08	m3
Thorium-234	1,92E-09	kBq
Uranium alpha	3,85E-10	kBq
Hydrogen fluoride	2,45E-13	kg
Ethane, 1,1,1,2-tetrafluoro-, HFC-134a	1,72E-09	kg
<i>Emissions to water</i>		
Aluminium	7,29E-09	kg
Fluoride	7,29E-10	kg
Copper	8,62E-12	kg
Zinc	2,52E-10	kg
Thorium-234	2,06E-08	kBq
Water, CL	1,62E-08	m3
Phosphate	2,25E-09	kg
Hydrocarbons, unspecified	4,05E-10	kg
Uranium alpha	5,44E-11	kBq
Nitrate	1,66E-08	kg
Chromium	2,52E-11	kg
Operación Planta y gestión de los residuos		
<i>Materials/fuels</i>		
Waste mineral oil	-3,6435E-07	kg
Hazardous waste, for incineration {GLO} market for Alloc Def, U	-2,1682E-07	kg
Fly ash and scrubber sludge	-4,8953E-07	kg
Argon, liquid	5,8341E-06	kg
Cement, Portland	2,0542E-07	kg
Carbon dioxide, liquid	3,7329E-08	kg
Sodium hypochlorite, without water, in 15% solution state	3,8671E-06	kg

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

SMR CA	Cantidad	Unidades
Steel, low-alloyed, hot rolled	3,5765E-07	kg
Cast iron	2,8835E-08	kg
Chemical, inorganic	5,2306E-07	kg
Nitrogen, liquid	1,3792E-05	kg
Concrete, normal	2,1772E-09	m3
Acetylene	8,0471E-09	kg
Anionic resin	1,4373E-08	kg
Oxygen, liquid	3,7329E-06	kg
Flat glass, coated	9,7682E-07	kg
Chemical, organic	3,0847E-07	kg
Water, decarbonised, at user	0,6342483 4	kg
Hydrogen, liquid	2,3024E-06	kg
Lubricating oil	3,6212E-07	kg
Paper, woodfree, coated	1,4373E-07	kg
Pitch	1,7234E-07	kg
Cationic resin	1,4373E-08	kg
Boric acid, anhydrous, powder	1,4373E-08	kg
Reinforcing steel	1,0506E-07	kg
Low level radioactive waste	4,11E-10	m3
	0	
<i>Electricity/heat</i>	0	
Diesel, burned in diesel-electric generating set	8,2706E-05	MJ
	0	
<i>Emissions to air</i>	0	
Xenon-133	0,1350116 5	kBq
Iodine-133	4,0682E-07	kBq
Barium-140	7,0859E-11	kBq
Antimony-125	5,2306E-09	kBq
Radioactive species, other beta emitters	1,938E-08	kBq
Cesium-137	1,6273E-09	kBq
Antimony-124	1,0618E-10	kBq
Krypton-85m	0,0022062 3	kBq
Xenon-135	0,0371058 5	kBq
Iodine-131	7,5553E-07	kBq
Cobalt-58	3,6659E-09	kBq
Silver-110	6,9965E-10	kBq

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

SMR CA	Cantidad	Unidades
Aerosols, radioactive, unspecified	1,2004E-09	kBq
Zirconium-95	1,292E-08	kBq
Noble gases, radioactive, unspecified	0,0578940 7	kBq
Niobium-95	2,5035E-11	kBq
Carbon-14	0,0017077 6	kBq
Cobalt-60	1,6921E-08	kBq
<i>Emissions to water</i>		
Hydrogen-3, Tritium	0,4157643 4	kBq
Radioactive species, alpha emitters	6,7506E-09	kBq
Cerium-141	3,9341E-08	kBq
Molybdenum-99	1,3412E-09	kBq
Silver-110	9,9023E-07	kBq
Iodine-131	1,8352E-06	kBq
Cobalt-57	1,9939E-06	kBq
Lanthanum-140	1,1065E-07	kBq
Tellurium-123m	3,5094E-07	kBq
Tellurium-132	1,8821E-08	kBq
Cesium-134	8,4271E-07	kBq
Zirconium-95	3,3529E-07	kBq
Ruthenium-103	6,3706E-08	kBq
Antimony-125	9,3212E-06	kBq
Manganese-54	2,9282E-06	kBq
Strontium-89	8,1588E-07	kBq
Zinc-65	5,8788E-08	kBq
Antimony-122	2,0207E-07	kBq
Antimony-124	9,2318E-06	kBq
Technetium-99m	6,2812E-07	kBq
Strontium-90	2,9059E-07	kBq
Cesium-136	6,2812E-08	kBq
Iodine-133	9,2988E-08	kBq
Sodium-24	2,2308E-06	kBq
Cerium-144	1,0774E-07	kBq
Chromium-51	1,6899E-06	kBq
Iron-59	9,3882E-08	kBq
Cobalt-60	8,8294E-05	kBq

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

SMR CA	Cantidad	Unidades
Niobium-95	6,8623E-07	kBq
Cesium-137	2,2353E-05	kBq
Cobalt-58	0,0002548 2	kBq
Niobium-95	6,86E-07	kBq
Cesium-137	2,24E-05	kBq
Cobalt-58	2,55E-04	kBq
Construcción de almacenamiento final de alta radiactividad		
<i>Resources</i>		
Transformation, from industrial area	6,67E-10	m2
Transformation, to industrial area	6,67E-10	m2
Transformation, from unknown	6,67E-10	m2
Occupation, industrial area	1,37E-08	m2a
Transformation, to unknown	6,67E-10	m2
<i>Materials/fuels</i>		
Concrete, normal	3,14E-09	m3
Reinforcing steel	6,03E-07	kg
Inert waste, for final disposal	-2,32E-05	kg
Building, multi-storey	2,67E-09	m3
Industrial machine, heavy, unspecified	8,62E-08	kg
	0,00E+00	
<i>Electricity/heat</i>	0,00E+00	
Diesel, burned in building machine	1,07E-07	MJ
	0,00E+00	
Consumo eléctrico Chile	1,33E-06	kWh
Construcción de almacenamiento final de baja radiactividad		
<i>Resources</i>		
Transformation, to industrial area	4,28E-08	m2
Occupation, industrial area	1,20E-06	m2a
Transformation, from industrial area	4,28E-08	m2
Transformation, to unknown	4,28E-08	m2
Transformation, from unknown	4,28E-08	m2

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

SMR CA	Cantidad	Unidades
<i>Materials/fuels</i>		
Inert waste, for final disposal	-3,95E-04	kg
Industrial machine, heavy, unspecified	2,11E-06	kg
Reinforcing steel	2,20E-05	kg
Building, multi-storey	1,71E-07	m3
Concrete, normal	1,14E-07	m3
Wastewater, unpolluted	-1,45E-07	m3
<i>Electricity/heat</i>		
Consumo eléctrico Chile	9,72E-05	kWh
Diesel, burned in building machine	1,97E-05	MJ
<i>Emissions to air</i>		
Methane, fossil	2,11E-06	
Construcción de almacenamiento intermedio de baja radiactividad		
<i>Resources</i>		
Occupation, industrial area	6,42E-06	m2a
Transformation, from pasture and meadow	1,05E-07	m2
Transformation, to unknown	1,05E-07	m2
Transformation, from industrial area	1,05E-07	m2
Transformation, to industrial area	1,05E-07	m2
<i>Materials/fuels</i>		
Concrete, normal	5,46E-08	m3
Steel, low-alloyed, hot rolled	1,48E-06	kg
Waste reinforced concrete	-1,38E-04	kg
Reinforcing steel	6,58E-06	kg
<i>Electricity/heat</i>		
Consumo eléctrico Chile	1,11E-06	kWh
Diesel, burned in building machine	2,51E-05	MJ

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

SMR CA	Cantidad	Unidades
Construcción de almacenamiento intermedio de alta radiactividad		
<i>Resources</i>		
Transformation, from industrial area	3,56E-09	m2
Transformation, to industrial area	3,56E-09	m2
Transformation, from unknown	3,56E-09	m2
Occupation, industrial area	7,31E-08	m2a
Transformation, to unknown	3,56E-09	m2
<i>Materials/fuels</i>		
Concrete, normal	1,67E-08	m3
Reinforcing steel	3,22E-06	kg
Inert waste, for final disposal	-1,24E-04	kg
Building, multi-storey	1,42E-08	m3
Industrial machine, heavy, unspecified	4,60E-07	kg
<i>Electricity/heat</i>		
Diesel, burned in building machine	5,69E-07	MJ
Consumo eléctrico Chile	7,08E-06	kWh

SMR CC	Cantidad	Unidades
Minería y fabricación de Concentrado		
<i>Resources</i>		
Transformation, to unknown	0,0002804	m2
Water, cooling, unspecified natural origin	0,00924382	m3
Uranium	0,00161767	kg
Occupation, mineral extraction site	0,00616255	m2a
Transformation, to mineral extraction site	0,0002804	m2
Transformation, from unknown	0,0002804	m2
Transformation, from industrial area	0,0002804	m2
<i>Materials/fuels</i>		
Mine infrastructure, open cast, uranium	9,5057E-11	p
Blasting	0,00040057	kg
	0	
<i>Electricity/heat</i>	0	
Diesel, burned in building machine	0,02465019	MJ
Diesel, burned in diesel-electric generating set	0,05623325	MJ

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

SMR CC	Cantidad	Unidades
	0	
<i>Emissions to air</i>	0	
Water/m3	0,00138657	m3
Radon-222	200,282792	kBq
Particulates, > 10 um	8,6276E-05	kg
Uranium alpha	0,00014482	kBq
	0	
<i>Emissions to water</i>	0	
Molybdenum	2,465E-06	kg
Aluminium	4,776E-06	kg
Manganese	0,0001063	kg
Lead	2,7731E-05	kg
Selenium	2,9272E-07	kg
Water, CL	0,00785725	m3
Ammonium, ion	1,3095E-05	kg
Chloride	0,00132495	kg
Radium-226	7,70318433	kBq
Vanadium	1,0014E-05	kg
Cadmium	1,4328E-07	kg
Suspended solids, unspecified	0,00323534	kg
Nitrate	3,2353E-06	kg
Uranium alpha	0,33894011	kBq
Barium	2,9272E-06	kg
Iron	5,2382E-05	kg
Thorium-230	0,70869296	kBq
Zinc	1,8488E-06	kg
Sulfate	0,07395057	kg
Magnesium	0,00016947	kg
Arsenic	1,4328E-07	kg
Conversión		
<i>Materials/fuels</i>		
Ammonia, liquid	9,1776E-06	kg
Water, decarbonised, at user	0,01835526	kg
Uranium conversion facility	1,149E-13	p
Average incineration residue	-6,2408E-06	kg
Low level radioactive waste	-2,2393E-08	m3

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

SMR CC	Cantidad	Unidades
Chemical, inorganic	1,9089E-06	kg
Chemical, organic	1,1013E-06	kg
Hydrogen fluoride	2,1659E-05	kg
Nitric acid, without water, in 50% solution state	3,3039E-05	kg
Quicklime, milled, loose	1,8355E-05	kg
Cement, unspecified	2,9736E-05	kg
	0	
<i>Electricity/heat</i>	0	
Consumo eléctrico Chile	0,00037812	kWh
Heat, district or industrial, natural gas	0,00013777	MJ
Heat, district or industrial, natural gas	0,02427473	MJ
	0	
<i>Emissions to air</i>	0	
Uranium-235	4,7724E-07	kBq
Hexane	6,975E-07	kg
Carbon monoxide, fossil	2,533E-08	kg
Protactinium-234	9,9118E-06	kBq
Hydrogen fluoride	9,9118E-09	kg
Particulates, > 2.5 um, and < 10um	2,6799E-08	kg
Water/m3	7,1127E-06	m3
Sulfur dioxide	2,0191E-07	kg
NM VOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin	4,4053E-09	kg
Nitrogen oxides	9,1776E-07	kg
Thorium-230	8,0763E-09	kBq
Thorium-234	9,9118E-06	kBq
Uranium-238	9,9118E-06	kBq
Uranium-234	9,1776E-06	kBq
Radium-226	1,3583E-09	kBq
	0	
<i>Emissions to water</i>	0	
Sodium	2,2393E-07	kg
Uranium-234	0,00019824	kBq
Calcium	3,047E-07	kg
Tin	2,533E-10	kg
Cadmium	6,2408E-11	kg
Copper	5,8737E-10	kg
Suspended solids, unspecified	1,2849E-07	kg

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

SMR CC	Cantidad	Unidades
Manganese	8,0763E-09	kg
Aluminium	2,533E-09	kg
Uranium-235	7,3421E-06	kBq
Barium	8,0763E-10	kg
Lead	6,2408E-11	kg
Nitrate	2,2393E-08	kg
Fluoride	9,9118E-09	kg
BOD5, Biological Oxygen Demand	1,2849E-08	kg
Water, RoW	1,1243E-05	m3
COD, Chemical Oxygen Demand	6,2408E-08	kg
Sulfate	1,0279E-07	kg
Chromium	3,6711E-10	kg
TOC, Total Organic Carbon	6,2408E-09	kg
Ammonium, ion	6,2408E-09	kg
Potassium	6,2408E-09	kg
Mercury	6,2408E-12	kg
Magnesium	1,2849E-08	kg
Uranium-238	0,00019824	kBq
Radium-226	5,1395E-08	kBq
Thorium-230	4,4053E-08	kBq
Iron	6,2408E-09	kg
Thorium-234	0,00018355	kBq
Protactinium-234	0,00018355	kBq
Titanium	6,2408E-11	kg
Zinc	2,533E-10	kg
DOC, Dissolved Organic Carbon	6,2408E-09	kg
Sulfide	6,2408E-10	kg
Chloride	3,1938E-07	kg
Phosphate	1,9089E-09	kg
Fabricación de Combustible		
<i>Materials/fuels</i>		
Methanol	1,5916E-09	kg
Soap	4,4763E-09	kg
Brass	8,9525E-09	kg
Steel, low-alloyed, hot rolled	7,4604E-07	kg
Low level radioactive waste	-1,5667E-09	m3

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

SMR CC	Cantidad	Unidades
Municipal solid waste	-1,1688E-06	kg
Aluminium, wrought alloy	2,4868E-07	kg
Acetylene	1,2434E-10	kg
Hydrogen peroxide, without water, in 50% solution state	3,4815E-09	kg
Polyvinylchloride, bulk polymerised	4,2276E-09	kg
Argon, liquid	8,9525E-09	kg
Hydrochloric acid, without water, in 30% solution state	9,9472E-10	kg
Concrete, normal	1,4424E-09	m3
Nitric acid, without water, in 50% solution state	7,4604E-09	kg
Sodium hydroxide, without water, in 50% solution state	1,3926E-08	kg
Chemical, organic	4,0784E-09	kg
Uranium enrichment centrifuge facility	5,5207E-14	p
Phosphoric acid, fertiliser grade, without water, in 70% solution state	5,9683E-10	kg
Nitrogen, liquid	1,9397E-09	kg
Oxygen, liquid	1,7905E-10	kg
Lubricating oil	4,5757E-08	kg
Water, decarbonised, at user	1,9894E-05	kg
Hydrogen, liquid	5,471E-11	kg
Spent anion exchange resin from potable water production	-2,8847E-07	kg
Chemical, inorganic	1,5468E-07	kg
Waste mineral oil	-1,1937E-08	kg
	0	
<i>Electricity/heat</i>	0	
Consumo eléctrico Chile	0,00042276	kWh
Emissions to air	0	
Ethanol	6,4657E-09	kg
Water/m3	7,7091E-09	m3
Thorium-234	1,4424E-09	kBq
Uranium alpha	2,8847E-10	kBq
Hydrogen fluoride	1,8402E-13	kg
Ethane, 1,1,1,2-tetrafluoro-, HFC-134a	1,2931E-09	kg
<i>Emissions to water</i>	0	
Aluminium	5,471E-09	kg
Fluoride	5,471E-10	kg
Copper	6,4657E-12	kg

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

SMR CC	Cantidad	Unidades
Zinc	1,89E-10	kg
Thorium-234	1,5418E-08	kBq
Water	1,2185E-08	m3
Phosphate	1,691E-09	kg
Hydrocarbons, unspecified	3,0339E-10	kg
Uranium alpha	4,0784E-11	kBq
Nitrate	1,2434E-08	kg
Chromium	1,89E-11	kg
Operación Planta y gestión de los residuos		
<i>Materials/fuels</i>		
Waste mineral oil	-3,6435E-07	kg
Hazardous waste, for incineration {GLO} market for Alloc Def, U	-2,1682E-07	kg
Fly ash and scrubber sludge	-4,8953E-07	kg
Argon, liquid	5,8341E-06	kg
Cement, Portland	2,0542E-07	kg
Carbon dioxide, liquid	3,7329E-08	kg
Sodium hypochlorite, without water, in 15% solution state	3,8671E-06	kg
Steel, low-alloyed, hot rolled	3,5765E-07	kg
Cast iron	2,8835E-08	kg
Chemical, inorganic	5,2306E-07	kg
Nitrogen, liquid	1,3792E-05	kg
Concrete, normal	2,1772E-09	m3
Acetylene	8,0471E-09	kg
Anionic resin	1,4373E-08	kg
Oxygen, liquid	3,7329E-06	kg
Flat glass, coated	9,7682E-07	kg
Chemical, organic	3,0847E-07	kg
Water, decarbonised, at user	0,63424834	kg
Hydrogen, liquid	2,3024E-06	kg
Lubricating oil	3,6212E-07	kg
Paper, woodfree, coated	1,4373E-07	kg
Pitch	1,7234E-07	kg
Cationic resin	1,4373E-08	kg
Boric acid, anhydrous, powder	1,4373E-08	kg
Reinforcing steel	1,0506E-07	kg
Low level radioactive waste	4,11E-10	m3

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

SMR CC	Cantidad	Unidades
	0	
<i>Electricity/heat</i>	0	
Diesel, burned in diesel-electric generating set	8,2706E-05	MJ
	0	
<i>Emissions to air</i>	0	
Xenon-133	0,13501165	kBq
Iodine-133	4,0682E-07	kBq
Barium-140	7,0859E-11	kBq
Antimony-125	5,2306E-09	kBq
Radioactive species, other beta emitters	1,938E-08	kBq
Cesium-137	1,6273E-09	kBq
Antimony-124	1,0618E-10	kBq
Krypton-85m	0,00220623	kBq
Xenon-135	0,03710585	kBq
Iodine-131	7,5553E-07	kBq
Cobalt-58	3,6659E-09	kBq
Silver-110	6,9965E-10	kBq
Aerosols, radioactive, unspecified	1,2004E-09	kBq
Zirconium-95	1,292E-08	kBq
Noble gases, radioactive, unspecified	0,05789407	kBq
Niobium-95	2,5035E-11	kBq
Carbon-14	0,00170776	kBq
Cobalt-60	1,6921E-08	kBq
<i>Emissions to water</i>		
Hydrogen-3, Tritium	0,41576434	kBq
Radioactive species, alpha emitters	6,7506E-09	kBq
Cerium-141	3,9341E-08	kBq
Molybdenum-99	1,3412E-09	kBq
Silver-110	9,9023E-07	kBq
Iodine-131	1,8352E-06	kBq
Cobalt-57	1,9939E-06	kBq
Lanthanum-140	1,1065E-07	kBq
Tellurium-123m	3,5094E-07	kBq
Tellurium-132	1,8821E-08	kBq
Cesium-134	8,4271E-07	kBq
Zirconium-95	3,3529E-07	kBq

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

SMR CC	Cantidad	Unidades
Ruthenium-103	6,3706E-08	kBq
Antimony-125	9,3212E-06	kBq
Manganese-54	2,9282E-06	kBq
Strontium-89	8,1588E-07	kBq
Zinc-65	5,8788E-08	kBq
Antimony-122	2,0207E-07	kBq
Antimony-124	9,2318E-06	kBq
Technetium-99m	6,2812E-07	kBq
Strontium-90	2,9059E-07	kBq
Cesium-136	6,2812E-08	kBq
Iodine-133	9,2988E-08	kBq
Sodium-24	2,2308E-06	kBq
Cerium-144	1,0774E-07	kBq
Chromium-51	1,6899E-06	kBq
Iron-59	9,3882E-08	kBq
Cobalt-60	8,8294E-05	kBq
Niobium-95	6,8623E-07	kBq
Cesium-137	2,2353E-05	kBq
Cobalt-58	0,00025482	kBq
Construcción y Desmantelamiento		
<i>Materials/fuels</i>		
Aluminium removed by drilling	2,9825E-06	kg
Concrete block	0,00100877	kg
Aluminium removed by drilling, conventional	7,5351E-07	kg
Steel, low-alloyed, hot rolled	0,00005	kg
<i>Electricity/heat</i>		
Consumo eléctrico Chile	1,4386E-09	MWh
Naphtha	4,6523E-05	kg
Construcción de almacenamiento final de baja radiactividad		
<i>Resources</i>		
Transformation, to industrial area	4,2763E-08	m2
Occupation, industrial area	1,1974E-06	m2a
Transformation, from industrial area	4,2763E-08	m2
Transformation, to unknown	4,2763E-08	m2

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

SMR CC	Cantidad	Unidades
Transformation, from unknown	4,2763E-08	m2
<i>Materials/fuels</i>		
Inert waste, for final disposal	-0,00039474	kg
Industrial machine, heavy, unspecified	2,1053E-06	kg
Reinforcing steel	2,1974E-05	kg
Building, multi-storey	1,7105E-07	m3
Concrete, normal	1,1447E-07	m3
Wastewater, unpolluted	-1,4474E-07	m3
	0	
<i>Electricity/heat</i>	0	
Consumo eléctrico Chile	9,7237E-05	kWh
Diesel, burned in building machine	1,9737E-05	MJ
	0	
<i>Emissions to air</i>	0	
Methane, fossil	2,1053E-06	kg
Construcción de almacenamiento intermedio de baja radiactividad		
<i>Resources</i>		
Occupation, industrial area	6,4211E-06	m2a
Transformation, from pasture and meadow	1,0526E-07	m2
Transformation, to unknown	1,0526E-07	m2
Transformation, from industrial area	1,0526E-07	m2
Transformation, to industrial area	1,0526E-07	m2
<i>Materials/fuels</i>		
Concrete, normal	5,4605E-08	m3
	0	
Steel, low-alloyed, hot rolled	1,4803E-06	kg
Waste reinforced concrete	-0,00013816	kg
Reinforcing steel	6,5789E-06	kg
	0	
<i>Electricity/heat</i>	0	
Consumo eléctrico Chile	1,1053E-06	kWh
Diesel, burned in building machine	2,5066E-05	MJ

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

ANEXO III

Datos por unidad funcional

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

Hoja en blanco intencionadamente

Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile. Informe N° 1.

	PWR ⁶		SMR ⁷		HWR ⁸
	CA	CC	CA	CC	CA
	<i>g/kWh</i>				
Minería y fabricación de concentrados	1,65	1,23	2,05	1,54	1,15
Conversión	0,0395	0,0296	0,0489	0,0367	0,0276
Enriquecimiento	0,0038	0,0029	0,0044	0,0033	0,0027
Fabricación de combustible	0,0029	0,0022	0,0033	0,0025	0,0020

⁶ La referencia para los datos de PWR es la [20]

⁷ La referencia para los datos de SMR es la [20]

⁸ La referencia para los datos de HWR es la [32]