

Informe Parcial 1: Estructura y metodología para el modelo de costos de  
una central nuclear de potencia en Chile

CCHEN

Noviembre 2017

20985 / IIT-002 v. 1

La impresión o copia de este documento convierte al mismo en una copia no controlada. La versión vigente se encuentra en la base de datos del Sistema de Gestión de IDOM en Lotus Notes

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

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



CCHEN

Informe Parcial 1: Estructura y metodología para el modelo de costos de una central nuclear de potencia en Chile

Redactado:	Revisado:	Aprobado:
<i>Firma</i>  P. Díaz	<i>Firma</i>  Carolina Labarta Diego González Jose Maria Garcia Serrano	<i>Firma</i>  Carolina Labarta
<i>Nombre</i> Pedro Díaz (PDB) Carlos Peterson (CPC)	<i>Nombre</i> Carolina Labarta (CLC) Diego González (DGC) Jose Maria Garcia Serrano (JMGS)	<i>Nombre</i> Carolina Labarta (CLC)
<i>Fecha</i> 11/2017	<i>Date</i> 11/2017	<i>Date</i> 11/2017

Área	Encargo	Informe	Versión	CD
NS	20985	IIT-002	1	07.04

*En blanco intencionadamente*

## TABLA DE VERSIONES

<i>Versión</i>	<i>Fecha</i>	<i>Objeto de la versión</i>
0	10/2017	Versión inicial
1	11/2017	Corregido tras comentarios CCHEN

## MODIFICACIONES RESPECTO A LA VERSIÓN ANTERIOR

Modificaciones de acuerdo a lo indicado en el acta de levantamiento de comentarios **E-02-LC-EC-001**

## LISTA DE PENDIENTES

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

## ÍNDICE DE CONTENIDO

<b>1.</b>	<b>ANTECEDENTES .....</b>	<b>5</b>
<b>2.</b>	<b>OBJETO.....</b>	<b>5</b>
<b>3.</b>	<b>ALCANCE .....</b>	<b>6</b>
<b>4.</b>	<b>NORMATIVA DE APLICACIÓN .....</b>	<b>7</b>
<b>5.</b>	<b>DEFINICIÓN DE LA ESTRUCTURA DE COSTOS .....</b>	<b>7</b>
5.1.	Estructura de referencia.....	7
5.2.	Descripción de la estructura propuesta .....	8
5.3.	Descripción de las partidas detalladas que forman la estructura de costos .....	12
5.3.1.	Construcción Overnight (12).....	14
5.3.2.	Costos de Operación (21) .....	15
5.3.3.	Costos del Ciclo de Combustible (22) .....	16
5.3.4.	Impuestos y tasas (23) .....	17
<b>6.</b>	<b>ESTIMACIÓN DE PLAZOS DE LAS ETAPAS DEL CICLO DE VIDA DE UNA CENTRAL NUCLEAR .....</b>	<b>18</b>
6.1.	Pre-construcción .....	19
6.2.	Construcción .....	19
6.3.	Puesta en marcha.....	21
6.4.	Operación .....	21
6.5.	Desmantelamiento.....	22
<b>7.</b>	<b>DESARROLLO DEL MODELO DE COSTOS .....</b>	<b>25</b>
7.1.	Estructura de Costos .....	25
7.2.	Cuadro de Mando .....	26
7.3.	Modelo financiero.....	27
7.4.	LCOE .....	29
7.5.	Riesgos .....	29
7.6.	Anexos del Modelo .....	30
<b>8.</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>30</b>
<b>9.</b>	<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>31</b>

## LISTA DE TABLAS

Tabla 5-1. Estructura de costos general de EMWGIF .....	8
Tabla 5-2. Estructura de costos propuesta .....	9
Tabla 5-3. Estructura detallada propia .....	13
Tabla 5-4. Descripción del contenido de las partidas detalladas para la Construcción Overnight .....	15
Tabla 5-5. Descripción del contenido de las partidas detalladas para los Costos de Operación .....	16
Tabla 5-6. Descripción del contenido de las partidas detalladas para los Costos del Ciclo de Combustible .....	17
Tabla 5-7. Descripción del contenido de las partidas detalladas para los Impuestos y tasas .....	18

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3-1. Fases y actividades de la metodología utilizada .....	6
Figura 6-1. Etapas del ciclo de vida de una central nuclear .....	18
Figura 6-2. Distribución de costos durante el ciclo de vida.....	24
Figura 7-1. Apartados del Modelo de Costos.....	25
Figura 7-2. Sub apartados de la estructura de costos .....	26
Figura 7-3. Sub apartados del cuadro de mando.....	27
Figura 7-4. Sub apartados del modelo financiero .....	28
Figura 7-5. Sub apartados del LCOE .....	29
Figura 7-6. Sub apartados del Análisis de riesgos.....	30

## ÍNDICE DE ACRÓNIMOS Y SIGLAS

CAREM	Central Argentina de Elementos Modulares
CNP	Central Nuclear de Potencia
CCHEN	Comisión Chilena de Energía Nuclear
EMWGIF	<i>Economic Modeling Working Group of the Generation IV International Forum</i>
GIF	<i>Generation IV International Forum</i>
HWR	<i>Heavy Water Reactor</i> (reactor de agua pesada)
IAEA	International Atomic Energy Agency ( <i>Organismo Internacional de la Energía Atómica, OIEA</i> )

LCOE	<i>Levelized Cost of Electricity</i>
LWR	<i>Light Water Reactor</i> (reactor de agua ligera)
PNP	Plan Nuclear de Potencia
O&M	<i>Operation &amp; Maintenance</i> (operación y mantenimiento)
SMR	Small Modular Reactor (reactor modular de baja potencia)
TIR	Tasa Interna de Retorno
VAN	Valor Actual Neto
WNA	<i>World Nuclear Association</i>

## 1. ANTECEDENTES

Desde su creación en 1965, la 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 un Plan Nuclear de Potencia (PNP) lleva varios años en discusión y evaluación en Chile.

Así pues, la Comisión Chilena de Energía Nuclear (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 de potencia 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 la competitividad que la energía nuclear tendría ante otras tecnologías de generación existentes en la matriz energética, tanto en términos operacionales, como económicos y financieros. Se busca en definitiva evidenciar los desafíos desde la mirada técnico-económica, para dar cumplimiento entre otros, a las políticas establecidas en Energía 2050 y hacerse cargo de los distintos desafíos que enfrenta el sector energético considerando los cambios actuales y futuros que atravesará el sector.

En este contexto, la CCHEN ha contratado a IDOM, mediante la licitación con referencia 872-115-LP17 "Modelo y Estimación de Costos para una Central Nuclear de Potencia en Chile", un servicio de asesoría para la estimación de los costos que tendría un proyecto de generación nucleoelectrónica en el país, evaluando tecnologías, así como sus riesgos financieros y factores críticos a lo largo del ciclo de vida de la central. En el documento de oferta técnica (1) ha quedado definido que las tecnologías a evaluar son las de Light Water Reactor (LWR), Heavy Water Reactor (HWR), y Small Modular Reactor (SMR).

## 2. OBJETO

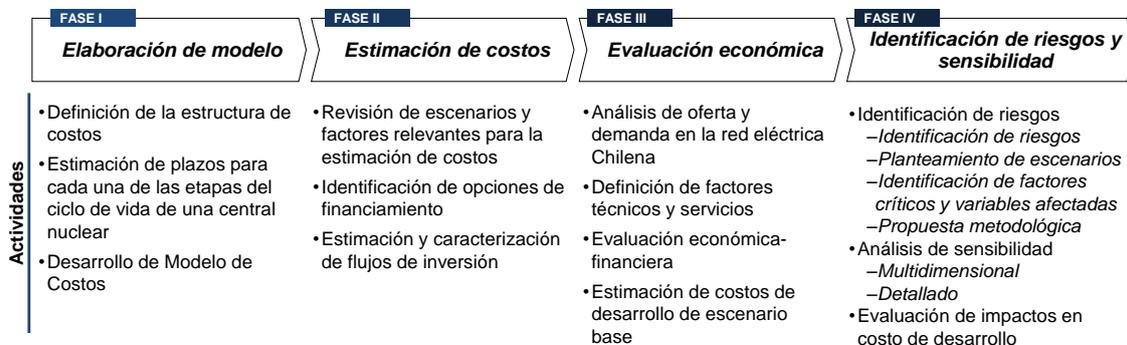
El presente documento corresponde al Informe Parcial 1 indicado en el documento de oferta técnica (1). El objeto del informe es presentar los resultados y conclusiones de la realización de las tareas enmarcadas en la Fase I de la Metodología: Elaboración de Modelo. Dichas tareas son las siguientes:

- Definición de la estructura de costos.

- Estimación de plazos para cada una de las etapas del ciclo de vida de una central nuclear.
- Desarrollo de Modelo de Costos.

### 3. ALCANCE

La metodología utilizada para el desarrollo del proyecto de “Modelo y Estimación de Costos para una Central Nuclear de Potencia en Chile” se divide en cuatro (4) fases, tal y como muestra la Figura 3-1.



**Figura 3-1. Fases y actividades de la metodología utilizada**

El contenido del presente documento abarca la realización de las actividades de la Fase I. Concretamente, los trabajos realizados al respecto de cada una de estas actividades en el marco del presente documento son:

- Definición de la estructura de costos: se definen unas partidas que plasman los diferentes tipos y orígenes de costos de una central nuclear.
- Estimación de plazos para cada una de las etapas del ciclo de vida de una central nuclear: se identifican las etapas del ciclo de vida de una central nuclear y se estiman los plazos de cada una de ellas.
- Desarrollo de Modelo de Costos: se define la metodología utilizada para el desarrollo del Modelo.

Estos trabajos se han llevado a cabo en base a documentación internacional y teniendo en cuenta la información que se incluirá en las siguientes fases del proyecto. El resto de fases y

actividades serán presentadas en el Informe Parcial 2 y en el Informe Final (1). Abarca tres tipos de tecnologías: LWR, HWR y SMR.

#### 4. **NORMATIVA DE APLICACIÓN**

No aplica normativa.

#### 5. **DEFINICIÓN DE LA ESTRUCTURA DE COSTOS**

La estructura de costos propuesta para la posterior realización del modelo económico se define y se describe en la presente sección. En pos de este objetivo, se indica, en primer lugar, la estructura de costos de referencia consultada para el posterior desarrollo de la estructura de costos propia (véase el apartado 5.1). En segundo lugar, en el apartado 5.2, se presenta la estructura de costos base y se describen las partidas generales de la misma. Finalmente, se describe, en el apartado 5.3, la división en partidas detalladas de cada una de las partidas generales y se indica el contenido de cada una de estas partidas.

##### 5.1. **Estructura de referencia**

La referencia utilizada para el desarrollo de la estructura de costo del presente estudio está contenida en el documento *Cost Estimating Guidelines For Generation IV Nuclear Energy Systems (2)* del *Economic Modeling Working Group of the Generation IV International Forum (EMWGIF)*. Dicha estructura, a la que se le da el nombre de *Code of Accounts (COA)*, es una reformulación y una actualización de la estructura propuesta por la *International Atomic Energy Agency (IAEA)*, localizada en el documento *Bid Invitation Specifications for Nuclear Power Plants (3)*, y es la referencia utilizada para la construcción y realización de estimaciones de costos en diversos estudios internacionales. La Tabla 5-1 presenta las partidas generales de la estructura de referencia.

Número identificador	Partida
10	Costos previos a la construcción
20	Costos directos capitalizados
30	Costos de servicios indirectos capitalizados
40	Costos del propietario / operador capitalizados
50	Costos capitalizados adicionales
60	Costos financieros capitalizados

Número identificador	Partida
70	Costos anuales de Operación y Mantenimiento
80	Costos anuales de combustible
90	Costos de financiación anuales

**Tabla 5-1. Estructura de costos general de EMWGIF**

Las partidas indicadas en la Tabla 5-1, también llamadas partidas de nivel 1, se dividen en otras de más detalle llamadas partidas de nivel 2. A su vez, algunas de estas últimas se desglosan en más partidas, de alcance ya reducido, a las que se las cita como de nivel 3 (2).

Pese a estar diseñada en el marco del *Generation IV International Forum* (GIF), la estructura presentada es genérica, y sería aplicable a cualquier proyecto de construcción de una central nuclear. Las principales diferencias entre esta estructura y la de la IAEA son, por una parte, la inclusión en la primera de una serie de partidas propias para plasmar los costes previos a la construcción (partida general 10) y, por otra parte, la simplificación de la cantidad y del nivel de detalle de algunas de las partidas de la primera respecto a la segunda.

A pesar de la simplificación respecto a la propuesta de la IAEA, la estructura de referencia ha de ajustarse para poder desarrollar el Modelo y Estimación de Costos para una Central Nuclear de Potencia en Chile porque está preparada para ser utilizada en un nivel de desarrollo de proyecto más avanzado que en el que se encuentra el plan nuclear de potencia de Chile. Concretamente, la estructura sería utilizable en el nivel de proyecto en el que ya se conoce la tecnología y el diseño de la central nuclear que se desea construir, que no es el caso del contexto de este análisis. No obstante, dada su vigencia y su adecuación para la estimación de los costos de una central nuclear, la estructura finalmente desarrollada, véase el apartado a continuación, está basada en la estructura del EMWGIF.

## **5.2. Descripción de la estructura propuesta**

La Tabla 5-2 muestra la estructura de costos propuesta. Esta estructura se basa en la presentada en la sección anterior, adaptándose de acuerdo a los siguientes dos objetivos. En primer lugar, es objetivo primordial que la información de costos que pueda extraerse de esta estructura sea relevante para el Modelo y Estimación de Costos para una Central Nuclear de Potencia en Chile y para los estudios que lleva a cabo la CCHEN para que, durante el próximo proceso de evaluación de la Política Energética Nacional, la energía nuclear de potencia pueda ser considerada dentro de las opciones a evaluar para la matriz energética nacional. En segundo lugar, se prioriza que las partidas de costos sean directamente asociables a la etapa del ciclo de

vida en la que incurren para poder determinar el flujo de caja a lo largo de dicho ciclo de vida mediante el Modelo de Costos.

ID 1 <sup>er</sup> nivel	ID 2 <sup>o</sup> nivel	Partida	Partida de la estructura de referencia
<b>10</b>		<b>Inversión inicial</b>	<b>10, 20, 30, 40, 50, y 60</b>
	11	Pre-construcción	10
	12	Construcción Overnight	20 y 50
	13	Puesta en marcha	30, 40, y 50
	14	Costos de interconexión con la red eléctrica	No se encuentra en la partida de referencia
	15	Costos de construcción de instalaciones para productos alternativos	No se encuentra en la partida de referencia
	16	Costos financieros	60
<b>20</b>		<b>Costos de la vida operativa</b>	<b>70, 80, y 90</b>
	21	Costos de operación	70
	22	Costos del ciclo de combustible	80
	23	Impuestos y tasas	90
	24	Costos financieros	90
	25	Costos de generación de instalaciones para productos alternativos	No se encuentra en la partida de referencia
<b>30</b>		<b>Desmantelamiento</b>	<b>50</b>
	31	Mano de obra	No se encuentra en la partida de referencia
	32	Equipamiento	No se encuentra en la partida de referencia
	33	Disposición	No se encuentra en la partida de referencia
	34	Otros	No se encuentra en la partida de referencia

**Tabla 5-2. Estructura de costos propuesta**

La partida 10, Inversión Inicial, se divide en seis (6) partidas de más detalle: Pre-construcción, Construcción *Overnight*<sup>1</sup>, Puesta en marcha, Costos de interconexión con la red eléctrica, Costos

<sup>1</sup> Los costos asociados a la construcción de una central nuclear si ésta se construyese en una noche.

de construcción de instalaciones para productos alternativos, y Costos financieros, y hace referencia a las partidas 10, 20, 30, 40, 50, y 60 de la estructura de referencia. Un porcentaje de los costos de la Inversión inicial se asocia al contratista EPC (*Engineering, Procurement, and Construction*), y el porcentaje restante se asocia directamente al que sería el propietario de la central nuclear.

La partida de Pre-construcción contiene los costos asociados a los estudios previos a la construcción, entre los que se incluyen:

- Estudios de viabilidad (estudios de mercado, búsqueda de financiación, desarrollo del plan de negocio, preparación y capacitación del equipo de gestión, y estudios de integración en la red eléctrica, entre otros), que supondrían un 2% del montante total de la Pre-construcción.
- Estudios de emplazamiento para la caracterización, selección, y licenciamiento del mismo (estudios geológicos, geotécnicos, medioambientales, análisis de sucesos externos, distribuciones de población, usos del agua y el terreno en la región, y estudios de demanda sobre el foco frío, entre otros), que supondrían un 15% del montante total de la Pre-construcción.
- Selección de la tecnología (fase de contactos con tecnólogos, preparación de la especificación de la oferta, evaluación de ofertas, negociación del contrato con el contratista seleccionado, y evaluación de la viabilidad y el impacto de las diferentes alternativas en cuanto a ciclo de combustible, entre otros), que supondría un 3% del montante total de la Pre-construcción.
- Licenciamiento y obtención de permisos por parte de la administración (estudio de seguridad nuclear con los análisis deterministas y probabilistas que se requieran, la preparación de la documentación técnica y el estudio de impacto ambiental, entre otros), que supondría un 80% del montante total de la Pre-construcción..

La división de la Pre-construcción en partidas de nivel 3 no se ha llevado a cabo porque no aportaría información valiosa al modelo y al posterior análisis debido a que su costo total es muy inferior al de la Construcción Overnight.

La partida de Construcción Overnight contiene todos los costos directos e indirectos asociados a la erección de la obra civil y al aprovisionamiento e instalación de equipos y sistemas de una central nuclear, además de posibles contingencias. Esta partida se divide en partidas de nivel 3 que se describen en la sección a continuación. La partida de Puesta en marcha incluye el costo

de los primeros elementos de combustible a introducir en el reactor, el costo de la primera carga de refrigerante y/o moderador del sistema Primario, así como el costo asociado a la propia puesta en marcha del reactor, que incluye: el reclutamiento y formación del personal de operación, y la realización de los tests de prueba y demostración requeridos.

La partida de Costos de interconexión con la red eléctrica hace referencia al monto necesario para construir la infraestructura eléctrica que permita transferir la energía eléctrica producida en la central a la red eléctrica convencional. Esto incluye la subestación y la línea de alta de transporte requerida para la evacuación de energía que, además, se aconseja sea redundante, para evitar que una caída de una línea obligue a la parada de la central. Estos costes suelen correr a cargo del responsable de la red. Los Costos de construcción de instalaciones para productos alternativos hacen referencia a la erección instalaciones que permitan obtener productos alternativos a la energía eléctrica como podrían ser desalinizadoras y/o sistemas de *process* o *district heating*. Finalmente, la partida de Costos financieros incluye los intereses concurridos durante el periodo de construcción correspondientes al financiamiento de una estructura de capital consistentes en fondos propios y deuda.

La partida 20, Costos de la vida operativa, se divide en cinco (5) partidas detalladas: Costos de operación, Costos del ciclo de combustible, Impuestos y tasas, Costos financieros, y Costos de generación de instalaciones para productos alternativos. La partida de Costos de operación contiene los costos fijos y variables asociados a la Operación y Mantenimiento (O&M) de una central nuclear durante el periodo de vida operativa de la misma, y hace referencia a las partidas 70 y 90 de la estructura de referencia. Esta partida se divide en partidas de nivel 3 que se describen en la sección a continuación. La partida de Costos del Ciclo de Combustible contiene los costos asociados a la obtención y fabricación del combustible nuclear, así como los costos asociados a su posterior almacenamiento o reprocesamiento. Esta partida hace referencia a la partida 80 de la estructura de referencia. Por otro lado, la partida de Impuestos y tasas incluye las diferentes tasas, tributos e impuestos a los que se ha de hacer frente durante la vida operativa de una central nuclear. Esta partida está incluida en el nivel 2 de la partida 70 de la estructura de referencia. Tanto esta partida como la de Costos del Ciclo de Combustible se dividen en partidas de nivel 3 que se describen en la sección a continuación. En cuanto a los Costos financieros, hacen referencia a los intereses a los que ha de hacer frente una central durante el periodo de operación de la misma, ya sean sobre la deuda inicial o sobre nuevas deudas que se adquieran para sustentar la operación. Esta partida está incluida en el nivel 2 de la partida 90 de la estructura de referencia. Finalmente, los Costos de generación de instalaciones para productos alternativos hacen referencia a todos los costos asociados a la operación y mantenimiento de instalaciones que permitan obtener productos alternativos a la energía eléctrica como podrían ser desalinizadoras y/o sistemas de *process* o *district heating*.

La partida 30, Desmantelamiento, incluye todos los costos asociados a los trabajos a realizar para acondicionar el emplazamiento de una central nuclear una vez acabada la vida operativa de la misma. Se divide el desmantelamiento en cuatro (4) partidas detalladas: Mano de obra, Equipamiento, Disposición, y Otros. La partida de Mano de obra hace referencia al costo de todo el personal que participa en la etapa de desmantelamiento. Este personal incluye el que está directamente relacionado con la descontaminación y desmantelamiento de los edificios y sistemas de una central nuclear, el personal necesario para trasladar el combustible gastado y otros residuos, el personal de gestión del proyecto, y el personal de seguridad, entre otros. Equipamiento incluye los costos de adquisición, o alquiler, y mantenimiento de todos los equipos y componentes, materiales, y consumibles necesarios para llevar a cabo las tareas de descontaminación, desmantelamiento, y traslado de combustible. La partida de Disposición incluye los costos asociados a la gestión y retirada de los residuos y materiales resultantes de las tareas de descontaminación y desmantelamiento. Por último, la partida Otros hace referencia a los costos de tasas y seguros, energía, el fondo para contingencias, y la monitorización y mantenimiento del combustible gastado, entre otros.

Pese a que los trabajos y operaciones por los que se imputan estos costos sucederían una vez acabada la vida útil de la central, el modelo incluye el desmantelamiento como un costo operativo que se debe ir separando obligatoriamente a lo largo de la vida operativa de la central para asegurar la disponibilidad de fondos para hacer frente al desmantelamiento al final de la misma. En el modelo se divide el monto estimado de desmantelamiento entre total de años de operación de la central, considerando en el modelo un factor de carga medio a lo largo de todos los años.. Esta partida está incluida en el nivel 2 de la partida 50 de la estructura de referencia

### 5.3. Descripción de las partidas detalladas que forman la estructura de costos

La Tabla 5-3 presenta la estructura de costos propia de forma detallada. A continuación, se describen cada una de las partidas de nivel 3 indicadas en la tabla.

ID 1 <sup>er</sup> nivel	ID 2 <sup>o</sup> nivel	ID 3 <sup>er</sup> nivel	Partida
<b>10</b>			<b>Inversión inicial</b>
	11		Pre-construcción
	12		Construcción Overnight
		121	<i>Mano de obra</i>
		122	<i>Materiales de construcción</i>
		123	<i>Equipos del sistema nuclear</i>
		124	<i>Equipos eléctricos y de generación</i>

ID 1 <sup>er</sup> nivel	ID 2 <sup>o</sup> nivel	ID 3 <sup>er</sup> nivel	Partida
		125	<i>Equipos de instrumentación y control</i>
		126	<i>Equipos mecánicos</i>
		127	<i>Ingeniería y Project management</i>
		128	<i>Contingencias</i>
	13		Puesta en marcha
	14		Costos de interconexión con la red eléctrica
	15		Costos de construcción de instalaciones para productos alternativos
	16		Costos financieros
<b>20</b>			<b>Costos de la vida operativa</b>
	21		Costos de operación
		211	<i>Personal</i>
		212	<i>Contratos de O&amp;M</i>
		213	<i>Materiales, suministros, consumibles e insumos</i>
		214	<i>Inversiones</i>
	22		Costos del ciclo de combustible
		221	<i>Minería y conversión</i>
		222	<i>Enriquecimiento</i>
		223	<i>Fabricación</i>
		224	<i>Back-end</i>
	23		Impuestos y tasas
		231	<i>Seguros</i>
		232	<i>Tasas variables de operación</i>
		233	<i>Tributos fijos</i>
		234	<i>Impuestos sobre el beneficio</i>
	24		Costos financieros
	25		Costos de generación de instalaciones para productos alternativos
<b>30</b>			<b>Desmantelamiento</b>
	31		Mano de obra
	32		Equipamiento
	33		Disposición
	34		Otros

**Tabla 5-3. Estructura detallada propia**

### 5.3.1. Construcción Overnight (12)

La partida de Construcción Overnight se divide en ocho (8) partidas que aportan más detalle a la estructura de costos. La Tabla 5-4 describe el contenido de cada una de estas partidas.

ID	Partida	Contenido
121	<i>Mano de obra</i>	Esta partida incluye el costo de personal directamente relacionado con la construcción e instalación de los edificios y sistemas de una central nuclear. Estos costos se incluyen de manera implícita en varias de las partidas de la estructura de referencia. No obstante, se ha decidido plasmarlos en una única partida porque la estimación del costo depende en gran medida del contexto Chileno. Los costos asociados a la formación del personal de operación de una central no están incluidos en esta partida, sino que forman parte de la partida 13.
122	<i>Materiales de construcción</i>	Esta partida incluye el costo del material necesario para erigir los edificios e instalaciones de una central nuclear, así como el costo de los equipos y equipamientos necesarios para tal fin (Ejemplos: hormigón, elementos estructurales, grúas, y otros). Estos costos se incluyen de manera implícita en varias de las partidas de la estructura de referencia. No obstante, se ha decidido plasmarlos en una única partida porque la estimación del costo depende en gran medida del contexto Chileno.
123	<i>Equipos del sistema nuclear</i>	Esta partida hace referencia al costo asociado a los equipos del <i>Nuclear Steam Supply System</i> (NSSS).
124	<i>Equipos eléctricos y de generación</i>	Esta partida incluye los costos asociados a la adquisición de los equipos eléctricos necesarios para la alimentación de energía eléctrica desde la red exterior (transformadores, interruptores, armarios, etc.), y los equipos necesarios para la generación de energía eléctrica, es decir, la turbina, el generador principal, y equipos asociados.
125	<i>Equipos de instrumentación y control</i>	Esta partida hace referencia a los costos asociados a los equipos y equipamientos de instrumentación y control de una central nuclear. Ejemplos de estos equipos son: paneles, racks, ordenadores de proceso, sistemas de monitorización, relés y PLCs, equipos de medida, software, y otros.
126	<i>Equipos mecánicos</i>	Esta partida incluye los costos asociados a los equipos de los sistemas de seguridad y sistemas auxiliares de la isla nuclear, los equipos de los sistemas de evacuación de calor, los equipos del sistema secundario de vapor, los equipos de tratamiento de residuos, y otros (Ejemplos: bombas, válvulas, tuberías, tanques, y otros).
127	<i>Ingeniería y Project management</i>	Esta partida hace referencia a costos indirectos de la construcción vinculados a los trabajos de ingeniería y Project management realizados tanto <i>on-site</i> como <i>off-site</i> durante la construcción e instalación de los edificios y sistemas de una central nuclear. Incluye también costos asociados a la garantía de calidad.

ID	Partida	Contenido
128	Contingencias	Partida cuyo objetivo es añadir un costo adicional al valor agregado de todas las partidas de Construcción Overnight para que la confianza en que el costo agregado real no supere el costo estimado sea la deseada.

**Tabla 5-4. Descripción del contenido de las partidas detalladas para la Construcción Overnight**

### 5.3.2. Costos de Operación (21)

La partida general de Costos de Operación se divide en cuatro (4) partidas detalladas: Personal, Contratos O&M, Materiales, e Inversiones. Los costos de operación se acostumbran a repartir en dos tipos: fijos y variables. Los costos fijos son aquellos a los que ha de hacer frente una central nuclear durante su vida operativa independientemente de su producción. Estos costos se suelen expresar por unidad de potencia instalada. Por otra parte, los costos variables son aquellos cuyo volumen depende de la producción de una central nuclear. Estos costos se suelen expresar por unidad de energía producida, y son, principalmente, impuestos y tasas incluidos en la partida 23. Las partidas de Personal, Contratos O&M, y Materiales, si bien son en su mayoría costos fijos, incluyen también un porcentaje de costo variable. La Tabla 5-5 describe el contenido de cada una de las partidas de los Costos de Operación.

ID	Partida	Contenido
211	Personal	Esta partida incluye los costos de salario, directos y asociados, del personal de gestión, operación, seguridad, mantenimiento, y otros, contratado directamente por el propietario u operador.
212	Contratos O&M	Esta partida hace referencia a los costos asociados a la subcontrata de servicios de operación y mantenimiento, incluyendo los imputables a las paradas de recarga en reactores <i>Light Water Reactor</i> .

ID	Partida	Contenido
213	Materiales, suministros, consumibles <sup>2</sup> e insumos	Esta partida hace referencia tanto a la adquisición de repuestos para el mantenimiento de los equipos de una central nuclear, como a la adquisición de los productos químicos y lubricantes que es necesario reponer durante la operación de una central nuclear.
214	Inversiones	Esta partida hace referencia al costo de todas aquellas inversiones de envergadura que pueda realizar una central nuclear durante su vida útil. A lo largo de su vida, las centrales deben hacer inversiones de actualización de su tecnología (ejemplo: digitalización, modificaciones para el alargamiento de vida, aumentos de potencia, actualización de sistemas de gestión documental, sustitución de equipos por obsolescencia, y otros) y adaptación a nuevos requisitos (ejemplo: medidas post-Fukushima, modificación de sistemas de protección contra-incendios por cambio de normativa, y otros). Esta partida no puede ser considerada ni costo fijo ni costo variable tal y como se han definido anteriormente.

**Tabla 5-5. Descripción del contenido de las partidas detalladas para los Costos de Operación**

### 5.3.3. Costos del Ciclo de Combustible (22)

La partida general de Costos del Ciclo de Combustible se divide en cuatro (4) partidas detalladas: Minería y conversión, Enriquecimiento, Fabricación, y Back-end. Esta división es válida tanto para ciclos abiertos, en los que el combustible gastado es almacenado, como para ciclos cerrados, en los que el combustible gastado es reprocesado para volverse a utilizar. Si bien se han separado en una partida general distinta para poder dar más detalle al respecto, los Costos del Ciclo de Combustible se imputan a la etapa operativa del ciclo de vida de una central nuclear, siendo uno de los principales costos variables en operación. La Tabla 5-6 describe cada una de las partidas que forman parte de los Costos del Ciclo de Combustible.

<sup>2</sup> Objetos, materiales o suministros destinados a utilizarse en planta sin que necesariamente se incorporen a las estructuras, sistemas, y componentes. *Commodities* que se gastan con su uso. Por ejemplo, electrodos, brocas, abrasivos, resinas, y siliconas, entre otros.

ID	Partida	Contenido
221	Minería y conversión	Esta partida hace referencia al porcentaje del costo total de un elemento de combustible que es imputable a la obtención del Uranio natural (minería), y su posterior conversión en UF <sub>6</sub> , en caso de ser enriquecido posteriormente, o su conversión en UO <sub>2</sub> en caso de utilizarse Uranio natural como combustible como en los reactores de diseño HWR. En el caso de un ciclo cerrado, esta partida también incluye la obtención de Uranio de elementos de combustible gastado.
222	Enriquecimiento	Esta partida hace referencia al porcentaje del costo total de un elemento de combustible que es imputable a la operación de Enriquecimiento del Uranio. Esta partida es nula para los reactores de diseño HWR.
223	Fabricación	Esta partida hace referencia al porcentaje del costo total de un elemento de combustible que es imputable al proceso de fabricación del elemento, incluyendo la obtención y conformación del material de las vainas de combustible.
224	Back-end	Esta partida hace referencia al costo de almacenar el combustible gastado, para el caso de ciclos abiertos, o al costo de reprocesar el combustible gastado y almacenar los residuos radioactivos restantes, para el caso de ciclos cerrados.

**Tabla 5-6. Descripción del contenido de las partidas detalladas para los Costos del Ciclo de Combustible**

#### 5.3.4. Impuestos y tasas (23)

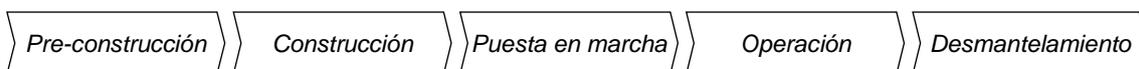
La partida general de Impuestos y tasas se divide en cuatro (4) partidas detalladas: Seguros, Tasas variables de operación, Tributos fijos, Impuestos sobre el beneficio. Si bien se han separado en una partida general distinta para poder distinguirlos de los costos asociados directamente con la operación de una central nuclear, los Impuestos y tasas se imputan a la etapa operativa del ciclo de vida de una central nuclear. Específicamente, las partidas de Seguros y Tasas variables de operación son costos variables asociados a la producción de una central nuclear. La cantidad y el valor asociado a las partidas Tasas variables de operación, Tributos fijos, e Impuestos sobre el beneficio depende principalmente de la legislación del país en el que se construye una central nuclear. Se ha observado en otros países que cabe la posibilidad de que el sector tenga un trato de fiscalización especial con respecto al resto de procesos productivos. La Tabla 5-7 describe el contenido de cada una de las partidas de Impuestos y tasas.

ID	Partida	Contenido
231	Seguros	Esta partida hace referencia al costo al que ha de hacer frente el propietario de una central nuclear en materia del seguro de responsabilidad civil que debe tener una central nuclear durante su operación y que debe cubrir la responsabilidad de la central en caso de un posible accidente nuclear. Este costo suele aplicarse como un porcentaje de la facturación anual, que depende de la energía producida.
232	Tasas variables de operación	Esta partida incluye el costo al que ha de hacer frente el propietario de una central nuclear en materia de tasas como, por ejemplo, una tasa medioambiental, una tasa sobre el uso de combustible o el combustible gastado, una tasa sobre la generación de residuos, y otras.
233	Tributos fijos	Esta partida incluye los costos asociados al pago de impuestos y tributos de valor fijo como, por ejemplo, la licencia de operación y explotación de una central nuclear, tasas fijas del regulador, o impuestos sobre bienes e inmuebles
234	Impuestos sobre el beneficio	Esta partida hace referencia al costo de los impuestos a pagar por el beneficio obtenido de la explotación de una central nuclear.

**Tabla 5-7. Descripción del contenido de las partidas detalladas para los Impuestos y tasas**

## 6. ESTIMACIÓN DE PLAZOS DE LAS ETAPAS DEL CICLO DE VIDA DE UNA CENTRAL NUCLEAR

El ciclo de vida de una central nuclear comprende las siguientes etapas: pre-construcción, construcción, puesta en marcha, operación, y desmantelamiento.



**Figura 6-1. Etapas del ciclo de vida de una central nuclear**

A continuación, se describe el alcance de cada etapa y se proponen valores específicos para los plazos de duración de cada etapa pese a que el modelo permitirá flexibilizar los tiempos a considerar. La Figura 6-2 al final de esta sección muestra un diagrama de Gantt en el que se distribuyen las partidas de la estructura de costos allá donde apliquen del ciclo de vida de una central nuclear.

## 6.1. Pre-construcción

La etapa de pre-construcción comprende las tareas de análisis de viabilidad del proyecto, evaluación de posibles emplazamientos, análisis y selección del emplazamiento final, obtención de permisos y derechos sobre el terreno del emplazamiento, preparación del emplazamiento, y la obtención de la licencia de construcción expedida por el organismo regulador, que requiere la realización de estudios como el Estudio de Impacto Ambiental (EIA) o el Estudio Preliminar de Seguridad (EPS) (4) (5). De acuerdo con lo indicado por la IAEA, no es posible estimar con precisión el plazo de duración de las tareas relacionadas con la elección del emplazamiento debido a que depende de varios factores<sup>3</sup> (4). De hecho, el documento *Managing Siting Activities in Nuclear Power Plants* (4) indica que estas tareas podrían tener un plazo de entre veintiún (21) y cuarenta y ocho (48) meses. Por otra parte, el documento *Project Management in Nuclear Power Construction: Guidelines and Experience* (5) estima que, típicamente, la duración de toda la etapa de pre-construcción sería de cinco (5) años y medio. Las tareas relacionadas con la elección del emplazamiento tienen una duración de veinticuatro (24) meses en dicha estimación. Siguiendo lo indicado por el documento *Project Management in Nuclear Power Construction: Guidelines and Experience* (5), se estima que la etapa de pre-construcción tendría un plazo de cinco (5) años y medio en el contexto del desarrollo de un Modelo y Estimación de Costos para una Central Nuclear de Potencia en Chile, aunque asumiendo que dicha estimación está sometida a una importante variabilidad. El impacto de esta variabilidad deberá ser evaluado en el marco de los análisis de sensibilidad a llevar a cabo mediante el modelo de costos, aunque, como se argumentará en los siguientes informes, no se espera que tenga impacto sobre el análisis de viabilidad de una central nuclear por el bajo costo en comparación con la Construcción.

## 6.2. Construcción

La etapa de construcción abarca desde el vertido del primer hormigón hasta la realización del primer test nuclear en el que se llega a un estado de criticidad del reactor, y comprende los trabajos de obra civil, los trabajos de instalación de los sistemas y equipos de una central nuclear, y los trabajos de conexión de una central nuclear con la red eléctrica exterior, entre otros. La estimación del plazo de duración de esta etapa para las tecnologías LWR y HWR se ha llevado a cabo a partir de datos de tiempos de construcción reales obtenidos del *Power Reactor*

---

<sup>3</sup> Criterios de selección del emplazamiento, disponibilidad de datos, la implicación de las partes interesadas, el proceso regulador, y otros.

*Informaton System*<sup>4</sup> de la IAEA. En el caso de la tecnología LWR, se utiliza como figura de estimación del plazo de duración de la etapa de construcción la mediana<sup>5</sup> de los tiempos de construcción de los últimos treinta (30) reactores conectados<sup>6</sup> a una red eléctrica. El resultado es una estimación del plazo de duración de la etapa de construcción de seis (6) años. En el caso de la tecnología HWR, la figura de estimación es la mediana de los tiempos de construcción de diecinueve (19) reactores conectados a una red eléctrica. Para este caso, el resultado es una estimación del plazo de duración de la etapa de construcción de siete (7) años. En ambos casos se han recogido valores mucho mayores a los estimados, por lo que se ha de asumir que los valores estimados están sometidos a una importante variabilidad cuyo impacto deberá ser evaluado en el marco de los análisis de sensibilidad a llevar a cabo mediante el modelo de costos y en el marco del análisis de los factores de riesgo, especialmente para el caso en el que la etapa de construcción se alargue más de lo previsto.

En el caso de reactores de tecnología SMR, no se puede realizar una estimación en base a datos reales debido a la escasa cantidad de reactores de esta tecnología que operan hoy en día<sup>7</sup>. La mayoría de empresas propietarias de diseños conceptuales SMR estiman, de forma preliminar, que la duración del periodo de construcción de sus reactores sería de tres (3) años para los primeros que se construyesen (6), pudiéndose reducir a dos (2) años conforme se avanza en el aprendizaje de la construcción de este tipo de reactores (6). Conservadoramente, se estima, en el contexto del desarrollo de un Modelo y Estimación de Costos para una Central Nuclear de Potencia en Chile, que una central nuclear de tecnología SMR tendría un plazo de construcción de tres (3) años. No obstante, la existencia de proyectos de construcción de reactores SMR cuyo periodo de construcción supera ya los tres (3) años<sup>8</sup>, y el hecho de que las estimaciones de referencia se han realizado en estados embrionarios de los proyectos, obligan a asumir que la estimación realizada puede estar sometida a una importante variabilidad cuyo impacto deberá ser evaluado en el marco de los análisis de sensibilidad a llevar a cabo mediante el modelo de costos.

---

<sup>4</sup> <https://www.iaea.org/PRIS/home.aspx>

<sup>5</sup> Se utiliza la mediana para evitar que los datos de reactores que se hayan construido muy rápido, o bien reactores cuyos periodos de construcción hayan sufrido parones o retrasos, sesguen la estimación hacia valores muy bajos o muy altos, respectivamente.

<sup>6</sup> Se utilizan datos de únicamente los últimos 30 reactores conectados con el objetivo de que el uso de tecnologías modernas de construcción quede plasmado en el valor estimado.

<sup>7</sup> Únicamente tres (3) reactores a tenor de un estudio de la *World Nuclear Association* (WNA) [6].

<sup>8</sup> La construcción del reactor CAREM Argentino comenzó en febrero de 2014 y se estima que será completada en 2019 [6].

### 6.3. Puesta en marcha

La etapa de puesta en marcha comprende las pruebas hidráulicas, en frío y en caliente, las pruebas nucleares, y las pruebas de conexión y sincronización con la red eléctrica exterior. Durante las pruebas hidráulicas la puesta en marcha convive con la etapa de construcción. De acuerdo a lo indicado en el documento *Project Management in Nuclear Power Construction: Guidelines and Experience* (5), se estima que el plazo de duración de esta etapa es de un (1) año.

### 6.4. Operación

La etapa de operación comprende todas las tareas a realizar para mantener la producción de energía eléctrica de una central nuclear. Entre estas tareas destacan: la operación del reactor, el mantenimiento de equipos y sistemas, la adquisición de nuevo combustible, la gestión del combustible gastado, las paradas para realizar las recargas de combustible nuevo en el caso de reactores de tecnología LWR, y modificaciones de diseño para mantener la central dentro de los estándares de operación segura requeridos, entre otros. Las centrales nucleares de la llamada generación II fueron diseñadas para tener una etapa de operación de entre treinta (30) y cuarenta (40) años. No obstante, en Estados Unidos algunos de ellos han aumentado sus licencias de operación hasta los sesenta (60) años y se conoce que la intención de algunos de éstos es pedir otro aumento de licencia de operación para llegar hasta los ochenta (80) años de vida operativa. Los reactores de generación III y III+ se diseñan y se construyen para que la etapa de operación de la central nuclear sea de al menos sesenta (60) años. Teniendo en cuenta la experiencia con los reactores de generación II, es probable que los reactores de generación III y III+ tengan vidas operativas de ochenta (80) o más años. Sin embargo, de forma conservadora, se estima, en el contexto del desarrollo de un Modelo y Estimación de Costos para una Central Nuclear de Potencia en Chile, que una central nuclear de nueva generación tiene un plazo de duración de la etapa de operación de sesenta (60) años. Se asume, sin embargo, que dicha estimación está sometida a una importante variabilidad cuyo impacto deberá ser evaluado en el marco de los análisis de sensibilidad a llevar a cabo mediante el modelo de costos.

Respecto a la tecnología SMR, los datos proporcionados por las empresas propietarias de diseños conceptuales de SMR señalan que la mayoría de reactores están diseñados para operar durante sesenta (60) años, aunque también existen diseños de tanto cuarenta (40) como ochenta (80) años (6). En consecuencia, se estima, en el contexto del desarrollo de un Modelo y Estimación de Costos para una Central Nuclear de Potencia en Chile, que una central nuclear de tecnología SMR tendría un plazo de duración de sesenta (60) años.

## 6.5. Desmantelamiento

La etapa de desmantelamiento comprende todas las tareas a realizar para retirar de forma segura a una central nuclear del servicio reduciendo la radiactividad residual a un nivel tal que permita al propietario u operador terminar la licencia de operación y liberarse de la propiedad del emplazamiento (7). Entre estas tareas destacan: la caracterización radiológica y física del emplazamiento, la descontaminación del emplazamiento y de las instalaciones en su interior, el desarme de estructuras, sistemas, y componentes, la gestión de materiales, y la gestión del combustible gastado, entre otros (8). La duración de la etapa de desmantelamiento depende principalmente del acercamiento utilizado. La *Nuclear Regulatory Commission* (NRC) reconoce cuatro (4) posibles estrategias (7): DECON, en la que los trabajos de descontaminación y desarme comienzan una vez acabada la vida operativa de la central nuclear. SAFSTOR, en la que la central nuclear se mantiene en condiciones óptimas y se monitoriza durante un periodo de latencia que permite que los niveles de radioactividad decaigan. Una vez estos niveles han decaído hasta el valor deseado se procede al desarme de central. ENTOMB<sup>9</sup>, en la que la zona radioactiva se envuelve en una estructura de material de máxima durabilidad como hormigón y se monitoriza durante un periodo de latencia que permite que los niveles de radioactividad decaigan. Una vez estos niveles han decaído hasta el valor deseado se procede al desarme de central. Finalmente, la NRC también contempla que se lleve a cabo una estrategia mixta entre DECON y SAFSTOR, es decir, que las instalaciones con un nivel de radioactividad suficientemente bajo sean desarmadas al acabar la vida operativa de la central, mientras que las instalaciones con un nivel de radioactividad superior al deseado se monitoricen durante un periodo de latencia hasta su posterior desarme. Pese a la variedad de estrategias, la NRC exige que la etapa de desmantelamiento dure un máximo de sesenta (60) años. De forma conservadora, se estima que de elegir una estrategia de desmantelamiento SAFSTOR o ENTOMB el plazo de duración de esta etapa sería de sesenta (60) años. Respecto a la estrategia DECON, existen estudios de licenciarios americanos que estiman que el tiempo de duración de la etapa de desmantelamiento en caso de seguirse esta estrategia sería de veinte (20) años si no fuese necesario realizar una gestión on-site del combustible gastado (9). En consecuencia, se estima, en el contexto del desarrollo de un Modelo y Estimación de Costos para una Central Nuclear de Potencia en Chile, que el plazo de duración de la etapa de desmantelamiento sería de veinte (20) años en caso de utilizarse la estrategia DECON. No obstante, se destaca de nuevo

---

<sup>9</sup> Hasta la fecha, ninguna de las centrales desmanteladas o en periodo de desmantelación de Estados Unidos han seguido la estrategia ENTOMB.

que los costos de desmantelamiento se suelen imputar durante el ciclo de operación por lo que quedarían reflejados a lo largo de esa etapa.

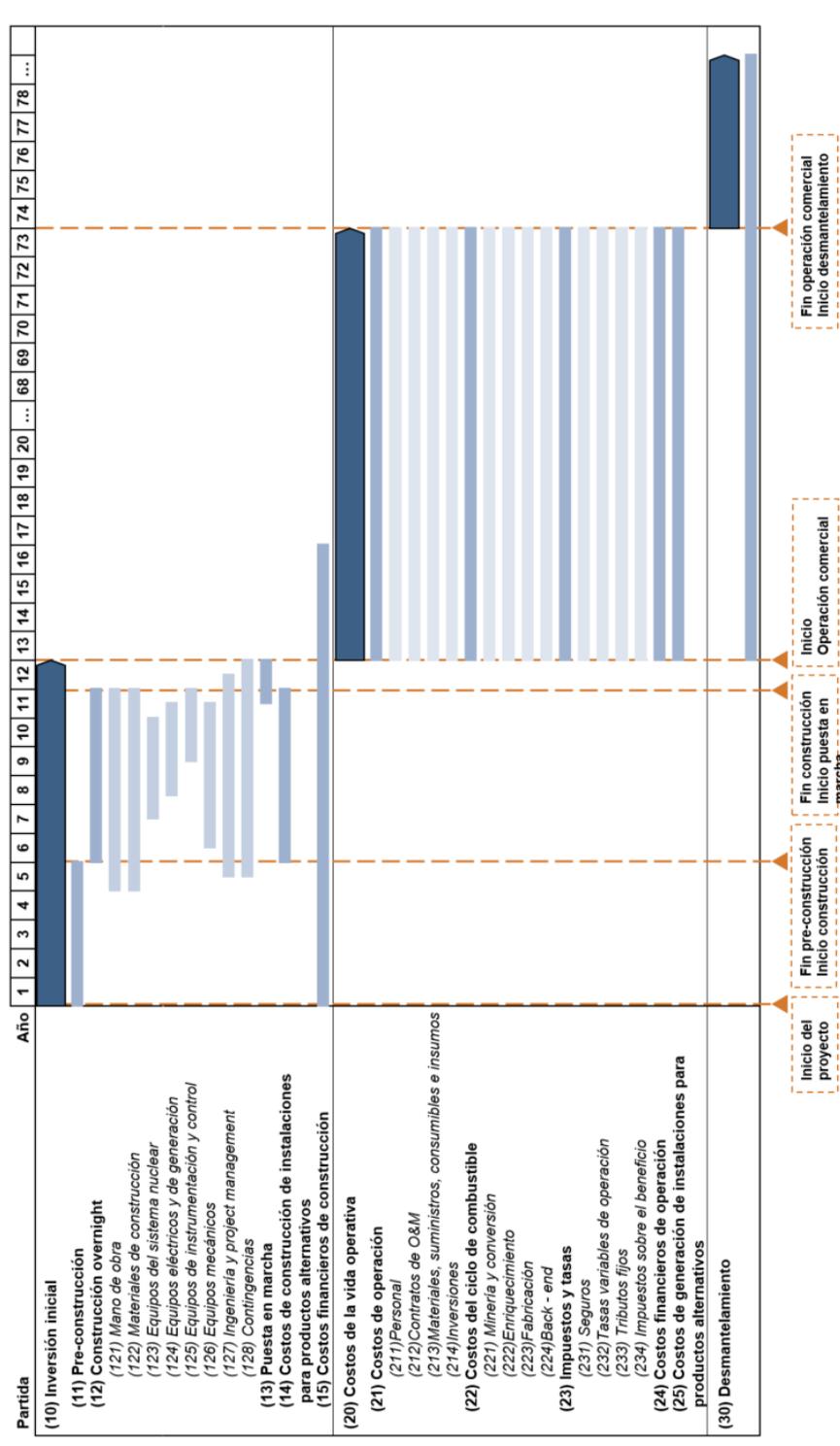


Figura 6-2. Distribución de costos durante el ciclo de vida

## 7. DESARROLLO DEL MODELO DE COSTOS

El entregable final consiste en una herramienta de modelación de costos y evaluación de rentabilidad en la que se podrá modelar la implementación de centrales nucleares de potencia en Chile. La herramienta incluye la estructura de costos, sus estimaciones ajustadas a las particularidades del país e hipótesis que permiten la modelación y cálculo de rentabilidad.

Los principales indicadores de rentabilidad que calculará el modelo son la Tasa Interna de Retorno (TIR), el Valor Actual Neto (VAN) y el Tiempo de retorno de la inversión (*Payback*). La TIR se refiere a la tasa de descuento que iguala los flujos de caja positivos y negativos que se generan en un proyecto de inversión, se utiliza para decidir sobre la aceptación o rechazo de proyectos de inversión. El VAN es la actualización de los flujos de caja futuros del proyecto a valores presentes descontándolos a un tipo de interés determinado por el Coste Medio Ponderado de Capital (WACC; Ponderación entre el coste de fondos propios y el coste de financiación). Por otro lado, el *Playback* refleja el tiempo requerido en recuperar los costos de la inversión. Como medida de viabilidad financiera del proyecto, la TIR debe ser siempre superior al WACC.

De manera general, la herramienta se compone de cinco partes: (0) Estructura de Costos, (1) Cuadro de Mando, (2) Modelo financiero, (3) LCOE y (4) Riesgos.

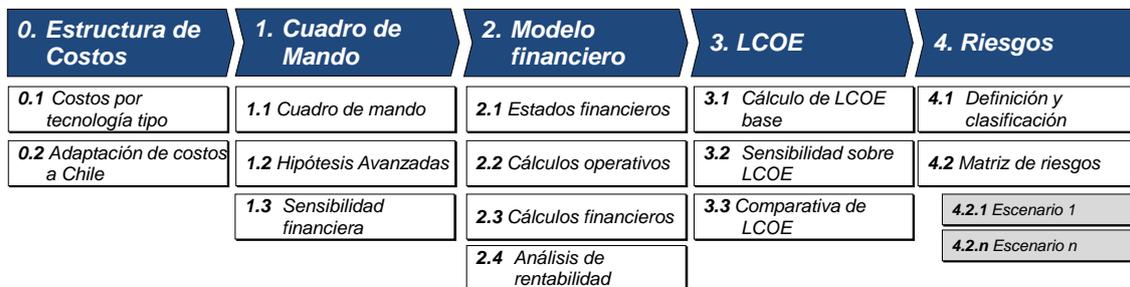
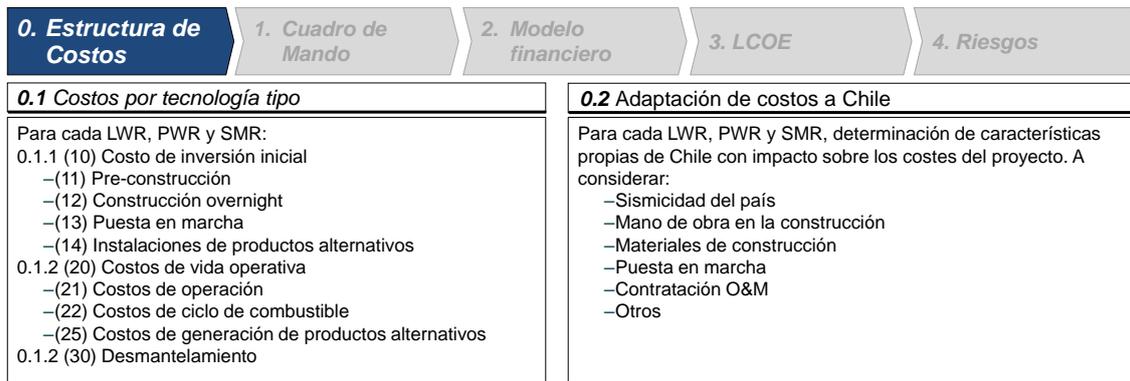


Figura 7-1. Apartados del Modelo de Costos

### 7.1. Estructura de Costos

El objetivo del apartado es definir los costos asociados a la instalación de una central nuclear de potencia en Chile. Consiste en dos sub apartados: (0.1) Costos por tecnología tipo y (0.2) Adaptación de costos a Chile.



**Figura 7-2. Sub apartados de la estructura de costos**

En (0.1) Costos por tecnología tipo, se proveerán costos globales para cada una de las tecnologías estudiadas. Mediante una metodología *top-down* y utilizando la estructura de costos definida en el presente informe, se estimarán los costos por partida.

Los costos serán definidos a partir de un análisis de bases de datos de proyectos nucleares ejecutados, aunado a información obtenida de *vendors* y experiencia del panel de expertos en el sector.

En el sub apartado (0.2) *Adaptación de costos a Chile*, se adaptarán las partidas a las particularidades del país. Algunas de las partidas a considerar son:

- Sismicidad del país
- Mano de obra en la construcción
- Materiales de construcción
- Otros

Algunas de las partidas se ajustarán a un valor específico mientras que otras serán flexibles, permitiendo al usuario adaptar el caso base en Chile. Un ejemplo es el porcentaje de participación local en la construcción y en contratos de O&M.

## 7.2. Cuadro de Mando

El Cuadro de Mando permite al usuario modelar el escenario de partida que se desea analizar. Para ello, se emplea como base la estructura de costos definida en el apartado (0) Estructura de Costos, así como las hipótesis necesarias para modelar la rentabilidad. Se compone de tres sub apartados: (1.1) Cuadro de mando y resultados, (1.2) Hipótesis Avanzadas y (1.3) Sensibilidad financiera.

0. Estructura de Costos	1. Cuadro de Mando	2. Modelo financiero	3. LCOE	4. Riesgos
	<b>1.1 Cuadro de mando y resultados</b> 1.1.1 Selección de reactor –LWR –HWR –SMR 1.1.2 Principales resultados del modelo –TIR, VAN, Payback, LCOE 1.1.3 Hipótesis generales –Fecha de inicio de construcción (año) –Periodo de construcción (años) –Periodo de operación (años) –Periodo de decommissioning (años) –Número de unidades –Potencia neta por unidad (MW) –Factor de planta –Tasa de descuento del LCOE	<b>1.2 Hipótesis Avanzadas</b> 1.2.1 Macroeconómicas 1.2.2 Inversión –(10) Inversión Inicial –Distribución de la inversión inicial –Depreciación –(30) Desmantelamiento 1.2.3 Operativas –(21) Costos de operación –(22) Costos de ciclo de combustible –Ingresos por operación 1.2.4 Fiscales –(23) Impuestos y Tasas 1.2.5 Financiación –Estructura de capital –(15, 24) Costos de financiación –Coste Medio Ponderado de Capital		<b>1.3 Sensibilidad financiera</b> 1.3.1 Análisis de sensibilidad sobre los resultados de rentabilidad

**Figura 7-3. Sub apartados del cuadro de mando**

El (1.1) *Cuadro de mando y resultados* permite al usuario seleccionar las variables generales del escenario base y visualizar su impacto en los resultados más relevantes de rentabilidad. Las variables generales a considerar serán: tipo de reactor, fecha de inicio de construcción, periodo de construcción, periodo de operación, tipo de desmantelamiento, número de unidades de la central, potencia eléctrica por unidad, factor de planta y tasa de descuento del costo nivelado de la electricidad (LCOE). Mientras que los principales resultados de rentabilidad son expresados por medio de la tasa interna de retorno (TIR), el valor actual neto (VAN, al costo medio ponderado del capital o WACC por sus siglas en inglés), el plazo de recuperación de la inversión inicial (*payback*) y el LCOE.

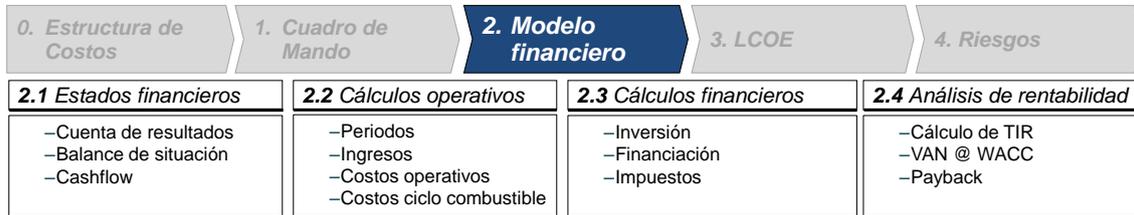
Las (1.2) *Hipótesis avanzadas* contienen todos los supuestos dentro y fuera del proyecto necesarios para el cálculo de su rentabilidad. El usuario podrá modificar estos valores a medida que avance la propuesta de implantación de una CNP en Chile y se adquiera mayor definición sobre ciertos factores. Este sub apartado contiene hipótesis macroeconómicas, de inversión (incluyendo las partidas 11, 12, 13, 14 y 15), operativas (incluyendo partidas 21 y 22), fiscales (incluyendo la partida 23) y de financiación.

En la (1.3) *Sensibilidad financiera* se analizan los impactos de variables definidas en las hipótesis generales y avanzadas a la rentabilidad financiera del escenario base. De esta manera el usuario puede hacer ajustes específicos al escenario base del modelo.

### 7.3. Modelo financiero

El apartado de (2) *Modelo financiero* modela la situación financiera de la CNP a lo largo de su ciclo de vida, incluyendo todos flujos de caja. El apartado cuenta con cuatro sub apartados: (2.1)

Estados financieros, (2.2) Cálculos operativos, (2.3) Cálculos financieros, y (2.4) Análisis de rentabilidad.



**Figura 7-4. Sub apartados del modelo financiero**

Los (2.1) Estados financieros o cuentas anuales dan a conocer la situación económica y financiera de la CNP durante su ciclo de vida, y los cambios año con año que, bajo las hipótesis generales y avanzadas definidas, podría llegar a suceder. Los estados financieros se componen de tres partes:

- Cuenta de resultados: muestra cómo se obtiene el ingreso neto de la CNP;
- Balance de situación: muestra los activos, pasivos y patrimonio de la CNP;
- *Cashflow* o flujo de efectivo: muestra las entradas y salidas de efectivo producidas.

En los (2.2) Cálculos operativos se modelan los costos variables y fijos asociados a la operación de la CNP. Se modelan los plazos, definidos por el usuario en el cuadro de mando, de los periodos de construcción, operación y desmantelamiento, y para cada uno de estos periodos, sus respectivos ingresos (venta de energía eléctrica, servicio de potencia, servicios complementarios), costos por operación y costos de ciclo de combustible.

Los (2.3) *Cálculos financieros* incluyen la modelización de la inversión, de la financiación y de los impuestos. En la inversión se hace el desglose de la partida de Inversión inicial y su distribución durante el periodo de construcción y se calcula su amortización a lo largo de su vida útil.

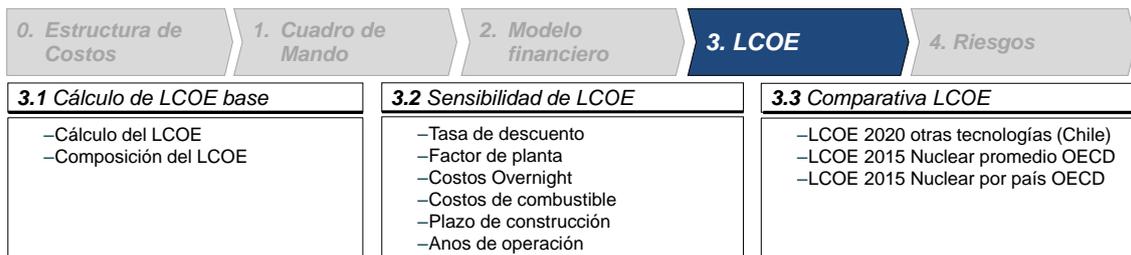
En Financiación se calculan los costos financieros durante la construcción y operación de la CNP a partir de las tasas definidas, los montos, duración de los periodos y de la estructura de capital (el porcentaje de fondos propios y de deuda) definida por el usuario en el (1) *Cuadro de Mando*.

Por último, en este sub apartado se modelan también los impuestos: impuestos sobre la renta, IVA en la inversión inicial e IVA en la operación.

El (2.4) Análisis de rentabilidad evalúa la sustentabilidad financiera del escenario base definido, calcula la TIR, el VAN y el *payback* del proyecto.

## 7.4. LCOE

El objetivo del apartado es calcular y analizar el costo nivelado de la electricidad (LCOE) del escenario base del proyecto. El LCOE representa el costo real por MWh incorporando la totalidad de los costos y la totalidad de la energía eléctrica producida durante el ciclo de vida. El apartado (3) LCOE consiste en tres sub apartados: (3.1) Cálculo de LCOE base, (3.2) Sensibilidad del LCOE y (3.3) Comparativa del LCOE.



**Figura 7-5. Sub apartados del LCOE**

En el (3.1) Cálculo del LCOE base se plasman todos los costos de inversión, operación y desmantelamiento durante el ciclo de vida de la CNP y la totalidad de la energía eléctrica que se espera que el proyecto genere. Se calcula el VAN de ambos flujos a una tasa de descuento definida por el usuario y se calcula el LCOE base. Así mismo, se presenta la composición del LCOE, los porcentajes atribuibles a la inversión inicial, costos financieros, costos de operación fijos y variables, y desmantelamiento.

En el sub apartado (3.2) Sensibilidad del LCOE, se realiza una prueba de sensibilidad en la que el usuario especifica el porcentaje de cambio con respecto al valor inicial de las variables que componen el LCOE base y visualiza el cambio con respecto al inicial mediante un gráfico de tornado.

Por último, en el sub apartado (3.3) Comparativa de LCOE, se compara el valor de LCOE base contra costos estimados de otras tecnologías de generación en Chile para 2020 y costos de CNP en otros países de la OECD.

## 7.5. Riesgos

El objetivo del apartado es analizar los riesgos de eventos asociados a proyecto de esta naturaleza, para ello, se definen variables críticas para cada evento y escenarios, y se evalúa su impacto sobre la rentabilidad de la CNP. El apartado incorpora dos sub apartados: (4.1) Definición y clasificación de riesgos y (4.2) Matriz de Riesgos.



**Figura 7-6. Sub apartados del Análisis de riesgos**

Recordando que un riesgo se define como como el múltiplo de la probabilidad de ocurrencia de un evento por su impacto, en el sub apartado (4.1) Definición y clasificación, se especifican las probabilidades de ocurrencia de los eventos y la clasificación de impactos con respecto a la TIR calculada del escenario base.

La (4.2) Matriz de riesgos es una herramienta semi cuantitativa en la que se catalogan los eventos identificados, típicos de proyectos nucleares y de proyectos de inversión en Chile, conforme a su riesgo. En esta matriz, se despliegan los eventos identificados y el usuario define, como porcentaje, la variación de los factores clave asociados a cada evento y la probabilidad de ocurrencia. El modelo calcula los impactos de la modificación del factor clave sobre la rentabilidad (puntos 4.2.1 a 4.2.n) y genera una clasificación de riesgo para el evento.

## 7.6. Anexos del Modelo

Finalmente, el modelo incluirá un apartado de anexos, con información relevante para la modelación y justificación de hipótesis utilizadas.

Dado que un factor relevante para el cálculo de rentabilidad del proyecto es el precio de los servicios de suministro eléctrico y de potencia en el mercado eléctrico chileno, se presenta una estimación de costos a 2030 implementando la metodología de indexación de licitaciones de suministro del Precio de Nudo de Energía de Largo Plazo de la Comisión Nacional de Energía.

## 8. CONCLUSIONES

En esta primera fase del proyecto, se ha propuesto una estructura de base para el desarrollo del Modelo de costos para una central nuclear de potencia en Chile. Dicha estructura está definida en base a referencias internacionales sobre metodologías de evaluación de costos de instalaciones nucleares y a la disponibilidad de datos en el sector. Está pensada para poder dar

una estimación de costos ajustable según ciertos factores en esta fase preliminar de estudio de viabilidad del proyecto nuclear en Chile.

La estructura consta de tres (3) partidas principales, Inversión inicial, Vida operativa y Desmantelamiento que permiten cubrir todo el ciclo de vida de la central. A nivel de tipología de coste, quedan cubiertos desde gastos de diseño, compra de equipos y construcción hasta gastos por tasas, seguros e impuestos, pasando por gastos operativos variables y fijos como el combustible o el personal, costes financieros, etc...

Así mismo se ha planteado la metodología de desarrollo del modelo de costos que se entregará en formato Excel al final del proyecto. El modelo incluirá la estimación de costos para las tecnologías LWR, HWR y SMR de acuerdo con los datos de la industria y ajustados para el caso Chile de acuerdo con las características propias del país. También dispondrá de una serie de variables que permitirán definir las hipótesis avanzadas del análisis de los costos. Con estos datos, permitirá realizar un análisis del LCOE y de la sensibilidad del mismo frente a variaciones de los costos estimados o de otros parámetros. Finalmente incluirá también el módulo de evaluación de riesgos permitiendo tener así una valoración robusta de la viabilidad de un proyecto nuclear en Chile.

## 9. REFERENCIAS

1. **IDOM Nuclear Services.** *Servicios de consultoría para la realización del estudio: Modelo y Estimación de Costos para una Central Nuclear de Potencia en Chile - Oferta técnica.* 2017.
2. **The Economic Modeling Working Group of the Generation IV International Forum.** GIF/EMWG/2007/004. *Cost Estimating Guidelines for Generation IV Nuclear Energy Systems.* 2007.
3. **IAEA.** Technical Report Series No. 275. *Bid Invitation Specifications for Nuclear Power Plants.* 1987.
4. —. IAEA Nuclear Energy Series No. NG-T-3.7. *Managing Siting Activities for Nuclear Power Plants.* 2012.
5. —. IAEA Nuclear Energy Series No. NP-T-2.7. *Project Management in Nuclear Power Construction: Guidelines and Experience.* 2012.

6. **WNA.** Small Nuclear Power Reactors. [En línea] 2017. <http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/small-nuclear-power-reactors.aspx>.
7. **NRC.** Backgrounder on Decommissioning Nuclear Power Plants . [En línea] 2015. <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/fact-sheets/decommissioning.html>.
8. **IAEA.** Decommissioning of nuclear installations. [En línea] <https://www.iaea.org/topics/decommissioning>.
9. **Southern California EDISON.** NRC Public Meeting. *Post-Shutdown Decommissioning Activities Report*. 2014.