



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

**DETERMINACIÓN DE CRITERIOS ESTRATÉGICOS DE LA CCHEN PARA LA
EVALUACIÓN DE SUS ALTERNATIVAS DE CONTINUIDAD DE LA PLATAFORMA
TECNOLÓGICA NUCLEAR**

**TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGISTER EN GESTIÓN Y POLÍTICAS
PÚBLICAS**

REMIGIO ELISEO CONTRERAS CAMUS

**PROFESOR GUÍA:
EDUARDO CONTRERAS VILLABLANCA**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
SARA ARANCIBIA CARVAJAL
EUGENIO VARGAS CARDENAS**

**SANTIAGO DE CHILE
2017**

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
AL GRADO DE:** Magister en Gestión y Políticas
Públicas

POR: Remigio Eliseo Contreras Camus

FECHA: 15/07/2017

PROFESOR GUÍA: Eduardo Contreras Villablanca

**DETERMINACIÓN DE CRITERIOS ESTRATÉGICOS DE LA CChEN PARA LA
EVALUACIÓN DE SUS ALTERNATIVAS DE CONTINUIDAD DE LA PLATAFORMA
TECNOLÓGICA NUCLEAR**

El problema a investigar corresponde a una necesidad de la Comisión Chilena de Energía Nuclear (CChEN) de identificar los criterios estratégicos que permitan evaluar alternativas de continuidad operacionales relacionadas a su plataforma nuclear. Entre estas alternativas de inversión se encuentran: (i) continuar operando el reactor RECH1 invirtiendo en reforzar su seguridad y actualización de algunos de sus sistemas, (ii) dejar de operar el reactor RECH1 y poner en funcionamiento el reactor RECH2, (iii) dejar de operar el reactor RECH1 y construir un nuevo reactor nuclear de investigación RECH3, y (iv) dejar de utilizar reactores nucleares de investigación para la producción de radioisótopos y actividades de investigación y desarrollo, siendo reemplazados por un ciclotrón, CICLO2, que cumpla las funciones del reactor RECH1. Conceptualmente, la toma de decisiones en el sector nuclear se encuentra ligada a las definiciones de nivel país de iniciar o no programas nucleares. Estas diferentes técnicas de tomas de decisiones hacen uso de conceptos comunes que sirven como referencia, junto a la opinión experta para la selección de los criterios estratégicos para el Proceso Analítico Jerárquico (AHP). La plataforma nuclear tiene una relevancia de nivel estratégico país al contar con un conocimiento e infraestructura únicos que permite una independencia regional y mundial de insumos de medicina nuclear. También existe la relevancia desde el punto vista social ya que elimina capas intermedias de la cadena de suministro que no agregan valor al ciudadano, llegando con productos de medicina nuclear más baratos democratizando su uso. El objetivo general de esta tesis y problema de investigación es determinar los criterios estratégicos que permitan una toma de decisión más allá del punto de vista económico. Es por esto que se utiliza la metodología Multicriterio, AHP, para identificar estos criterios y realizar una simulación con valores obtenidos desde una opinión experta y fuentes bibliográficas. Luego de realizar la simulación de evaluación, es la alternativa CICLO2, quien obtiene la mejor puntuación dado que la producción de las nuevas tecnologías permiten casi en su totalidad producir los mismos isotopos de reactor presentando menor riesgo, requiriendo menor gestión de desechos y menor protección radiológica. El análisis AHP requiere mayor profundidad, dado que la evaluación social de todas las alternativas requiere un estudio más profundo que no está en el alcance de este trabajo. Las alternativas de los reactores nucleares de investigación: RECH1, RECH2 y RECH3 presentan un gran potencial ya que permiten aplicaciones nucleares transversales y relacionadas con las investigaciones únicas a nivel país.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi esposa, hija e hijo quienes han estado a mí lado mientras he realizado esta tesis y mis estudios.

A mi profesor guía y profesores lectores quienes me han entregado su conocimiento y sus sabios consejos que me han permitido realizar este trabajo.

A mi institución en la cual he trabajado y me ha brindado la oportunidad de realizar este documento.

A mis jefaturas quienes me han entregado las facilidades en los momentos más oportunos.

A mis compañeros de trabajo quienes han colaborado con su conocimiento experto.

A todos ellos dedico esta obra con cariño y gran agradecimiento.

AGRADECIMIENTOS

Les agradezco a mi Institución, la Comisión Chilena de Energía Nuclear, a la Universidad de Chile, a CONYCIT y al Director del Programa por haberme dado la oportunidad de realizar el Programa de Magister y haber aprendido tanto.

Agradezco a todo el cuerpo Docente del Magister por su excelencia académica y entrega para con sus alumnos y en especial conmigo.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	1
1.4 OBJETIVOS	4
1.5 ALCANCE	5
1.5 ANTECEDENTES DEL CASO	6
1.5.1 EL SECTOR NUCLEAR	6
1.5.2 EL SECTOR NUCLEAR CHILENO	9
1.5.3.1 REGULACIÓN INTERNACIONAL	13
1.5.3.2 REGULACIÓN NACIONAL	15
1.5.4 INVESTIGACIÓN EN EL ÁREA NUCLEAR	15
1.5.5 SISTEMA NACIONAL DE INVERSIONES	18
2. MARCO CONCEPTUAL	20
2.1 HITOS EN EL DESARROLLO DE UNA INFRAESTRUCTURA PARA EL USO DE LA POTENCIA NUCLEAR	21
2.2 EVALUACIÓN SOSTENIBLE DE LOS SISTEMAS DE LA ENERGÍA NUCLEAR	23
2.3 UN ENFOQUE DE RIESGOS PARA LA TOMA DE DECISIONES	26
3. MARCO METODOLÓGICO	31
3.1 TOMA DE DECISIONES	31
3.2 MECANISMOS DE SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS	32
3.3 MÉTODOS MULTICRITERIO	34
3.4 PROCESO ANALÍTICO JERÁRQUICO	35
3.5. APLICACIÓN DEL MÉTODO	42
3.5.1. DEFINICIÓN DEL GRUPO DE EXPERTOS	42
3.5.2. ESQUEMA JERÁRQUICO	43
3.5.3. SELECCIÓN DE CRITERIOS	46
3.5.4. DEFINICIÓN DE INDICADORES	52
4. RESULTADOS	100
4.1 ANÁLISIS DE INDICADORES Y ESTANDARIZACIÓN DE INDICADORES	100
4.2 ESTABLECIMIENTO DE RANKING	104
5. CONCLUSIÓN	106
6. GLOSARIO DE SIGLAS	107

7. BIBLIOGRAFÍA	109
ANEXO 1 - PRODUCTOS CCHEN	112
ANEXO 2 – RESULTADOS RELEVANTES CCHEN 2014	114
ANEXO 3 – AHP ANEXOS	116

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Plataforma Nuclear de la Comisión Chilena de Energía Nuclear	3
Tabla 2: Fases de la implementación de un programa nuclear	22
Tabla 3: Tabla de hitos a alcanzar por fases de un Programa Nuclear	22
Tabla 4: Resumen del principio básico, requerimientos de usuario y criterios en la metodología INPRO	25
Tabla 5: Resumen de Metodos de Selección de Alternativas en la Toma de Decisiones	33
Tabla 6: Resumen de Métodos Multicriterio	34
Tabla 7: Escala para la comparación de pares de alternativas de Saaty.	37
Tabla 8: Índice aleatorios por tamaño de matriz	39
Tabla 9: Pasos del proceso de una Evaluación Multicriterio	41
Tabla 10: Roles y Expertos que participan en el Modelo AHP	43
Tabla 11: Umbrales de Indicador Seguridad Nuclear	56
Tabla 12: Descripción Cualitativa de Niveles del Indicador Seguridad Nuclear	56
Tabla 13: Umbrales de Indicador Seguridad Nuclear para Ciclotrones	57
Tabla 14: Umbrales del Indicador Protección Radiológica	58
Tabla 15: Descripción Cualitativa de Niveles del Indicador de Protección Radiológica	59
Tabla 16: Ítems del indicador Emplazamiento tipo Ranking	61
Tabla 17: Umbrales del Indicador Emplazamiento	61
Tabla 18: Umbrales del Indicador Impacto en la Construcción	65
Tabla 19: Umbrales del Indicador Impacto en la Operación	67
Tabla 20: Umbrales del Indicador Impacto en el Desmantelamiento	69
Tabla 21: Descripción Cualitativa de los Niveles del Indicador Impacto en el Desmantelamiento	70
Tabla 22: Umbrales del Indicador VAN Social	71
Tabla 23: Umbrales del Indicador IVAN	72
Tabla 24: Umbrales del Indicador Sensibilidad	73
Tabla 25: Umbrales del Indicador $NMLIN_A$	75
Tabla 26: Umbrales del Indicador $NMLIN_p$	76
Tabla 27: Umbrales del Indicador Nuevos Radioisótopos no producidos en el mercado Chileno	77
Tabla 28: Umbrales del Indicador Flujo de Neutrones Térmicos	79
Tabla 29: Umbrales del Indicador Flujo de Neutrones Epitérmicos	79
Tabla 30: Umbrales del Indicador Flujo de Neutrones Rápidos	80
Tabla 31: Umbrales del Indicador Potencia del Reactor	81
Tabla 32: Umbrales del Indicador Nivel de Energía de Protones	82
Tabla 33: Umbrales del Indicador Nivel de Energía de Deutrones	83
Tabla 34: Umbrales del Indicador Producción	85
Tabla 35: Umbrales del Indicador Número de Personas con Control Dosimétrico	86
Tabla 36: Umbrales del Indicador Número de Calibraciones Anuales	87
Tabla 37: Umbrales del Indicador Cobertura de Radioisótopos por Tratamiento	89
Tabla 38: Umbrales del Indicador Cobertura de Radioisótopos por Prevención	90
Tabla 39: Umbrales del Indicador Confiabilidad	93
Tabla 40: Umbrales del Indicador Tiempo de Respuesta de Suministro	95
Tabla 41: Umbrales del Indicador Confiabilidad	98
Tabla 42: Umbrales del Indicador Polarización	99
Tabla 43: Resumen de Indicadores y su normalización de los Aspectos de Seguridad	100
Tabla 44: Resumen de Indicadores y su normalización de los Aspectos de Desarrollo	101
Tabla 45: Resumen de Indicadores y su normalización de los Aspectos de Lineamiento Dirección Ejecutiva	102
Tabla 46: Resumen de Indicadores y su normalización de los Aspectos de Riesgos	103
Tabla 47: Resumen de Indicadores y su normalización con Evaluación Final	104

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Matriz Energética Mundial Según Origen	6
Figura 2: Esquema de un Reactor Nuclear de Potencia (PWR).	7
Figura 3: PET o Tomografía por emisión de positrones	8
Figura 4: Submarino nuclear Nautilus	8
Figura 5: RECH1 reactor nuclear de investigación del CEN La Reina	9
Figura 6: Bombardeo de neutrones – Técnica de activación neutrónica	10
Figura 7: Ciclotrón Cyclone 18/9	11
Figura 8: Tomografía por emisión de positrones	11
Figura 9: Esquema de Planta de Irradiación Multipropósito	12
Figura 10: Complemento entre seguridad nuclear y protección radiológica	14
Figura 11: Representación esquemática de las fases e hitos de un programa nuclear	23
Figura 12: Elementos claves en el proceso integrado de toma de decisiones con gestión de riesgos	28
Figura 13: Integración de elementos determinísticos y probabilísticos de IRIDM	29
Figura 14: Proceso de Toma de Decisión General	31
Figura 15: Jerarquía Simple de un Modelo AHP	36
Figura 16: Establecimiento de prioridades de un Modelo AHP	37
Figura 17: Proceso de una evaluación Multicriterio, AHP	41
Figura 18: Árbol Jerárquico de Criterios del Modelo Desarrollado	44
Figura 19: Árbol Jerárquico de Criterios – Comparación de Pares – Pesos Locales y Globales	45
Figura 20: Escala Internacional de Eventos Radiológicos INES	53
Figura 21: Principios de la Seguridad Nuclear	54
Figura 22: Colección de normas de seguridad del Organismo Internacional de Energía Atómica	54
Figura 23: Árbol de Modelación de Eventos con RAT	55
Figura 24: Instalaciones de primera Categoría de Nivel País	88
Figura 25: Teoría Unificada de la Aceptación de la Tecnología	92
Figura 26: Confianza en reguladores nucleares, operadores y legislación	96
Figura 27: Promedios geométricos de las compensaciones de pares de los expertos	105
Figura 27: Árbol Jerárquico de Criterios – Visión Experto Seguridad Nuclear	116
Figura 28: Árbol Jerárquico de Criterios – Visión Experto Tecnología Nuclear	117
Figura 29: Árbol Jerárquico de Criterios – Visión Experto Aspectos Sociales	118

INDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Escala Normalizada Experto del Indicador de Seguridad Nuclear	56
Gráfico 2: Escala Normalizada Experto Ajustada del Indicador de Seguridad Nuclear	56
Gráfico 3: Escala Normalizada del Indicador Evaluación de Seguridad en Ciclotrones	57
Gráfico 4: Escala Normalizada Experto del Indicador de Protección Radiológica	59
Gráfico 5: Escala Normalizada Experto Ajustada del Indicador de Protección Radiológica	59
Gráfico 6: Escala Normalizada Experto del Indicador de Emplazamiento.....	62
Gráfico 7: Escala Normalizada Experto Ajustada del Indicador de Emplazamiento.....	62
Gráfico 8: Escala Normalizada Experto del Indicador Impacto en la Construcción	66
Gráfico 9: Escala Normalizada Experto Ajustada del Indicador Impacto en la Construcción	66
Gráfico 11: Escala Normalizada Experto del Indicador Impacto en la Operación	67
Gráfico 12: Escala Normalizada Experto Ajustada del Indicador Impacto en la Operación	67
Gráfico 12: Escala Normalizada Experto del Indicador Impacto en el Desmantelamiento	69
Gráfico 13: Escala Normalizada Experto Ajustada del Indicador Impacto en el Desmantelamiento	69
Gráfico 13: Escala Normalizada del Indicador VAN Social	71
Gráfico 15: Escala Normalizada Experto del Indicador IVAN.....	72
Gráfico 16: Escala Normalizada Experto Ajustada del Indicador IVAN	72
Gráfico 17: Escala Normalizada del Indicador Sensibilidad.....	74
Gráfico 18: Escala Normalizada del Indicador NMLIN _A	76
Gráfico 19: Escala Normalizada del Indicador NMLI _p	77
Gráfico 20: Escala Normalizada del Indicador NNR.....	78
Gráfico 21: Escala Normalizada del Indicador FNT.....	79
Gráfico 22: Escala Normalizada del Indicador FNE.....	80
Gráfico 23: Escala Normalizada del Indicador FNR	81
Gráfico 24: Escala Normalizada del Indicador Potencia del Reactor.....	82
Gráfico 25: Escala Normalizada del Indicador NEP	83
Gráfico 26: Escala Normalizada del Indicador NED.....	84
Gráfico 27: Escala Normalizada del Indicador IPR.....	85
Gráfico 28: Escala Normalizada del Indicador NPCD.....	86
Gráfico 27: Escala Normalizada del Indicador NCA.....	87
Gráfico 30: Escala Normalizada del Indicador ICRT.....	89
Gráfico 31: Escala Normalizada del Indicador ICRP.....	90
Gráfico 32: Escala Normalizada del Indicador Confiabilidad Tecnológica.....	93
Gráfico 33: Escala Normalizada del Indicador Tiempo de Respuesta de Repuestos	95
Gráfico 34: Escala Normalizada del Indicador Compromiso.....	98
Gráfico 35: Escala Normalizada del Indicador Polarización	99

1. Introducción

1.1. Planteamiento del Problema de Investigación

La Comisión Chilena de Energía Nuclear (CChEN) actualmente pasa por una coyuntura, donde a través de procesos de revisión y fortalecimiento institucional, se han identificado diversas acciones a realizar que requieren un análisis de carácter estratégico más profundo que permita trazar la identificación de los beneficios y costos sociales de nivel país para seguir contribuyendo de manera eficaz a la generación de valor público para la nación¹.

La CChEN, es una institución gubernamental dependiente del Ministerio de Energía, que fue creada por ley el año 1965 con el propósito de generar valor público a través de la explotación segura de las aplicaciones de las radiaciones ionizantes. Para potenciar este rol es que en el año 1974 entra en operación el reactor nuclear de investigación RECH-1 el cual actualmente es un elemento estratégico fundamental en la cadena de producción de radioisótopos, los que son distribuidos a distintos centros de salud para ser utilizados en aplicaciones de medicina nuclear. También el reactor sirve como pilar fundamental para actividades de investigación y desarrollo que se realizan en la institución. El reactor RECH-1 es una instalación que ha estado funcionando con los más altos estándares de seguridad desde hace más de 40 años, esto hace que los costos de mantenimiento hayan aumentado y que su equipamiento esté quedando desactualizado. Es por esto que se requiere tomar decisiones de inversión para dar continuidad y eventualmente ampliar la oferta de servicios que la tecnología nuclear presta a la sociedad y continuar haciéndolo de manera segura, por lo cual este es el momento propicio para replantear tanto la visión institucional, como la mirada país respecto al rol que la tecnología nuclear tiene a través de los beneficios que ésta entrega².

Se han visualizado cuatro alternativas de solución a la problemática, estas son: (i) continuar operando la plataforma tecnológica actual invirtiendo en reforzar la seguridad de ésta y en su actualización, específicamente en el reactor RECH-1, (ii) dejar de operar el reactor RECH-1 y poner en funcionamiento el reactor RECH-2, el cual se encuentra sólo con actividades de mantenimiento desde mediados de la década del 80 por lo que se hace necesaria la revisión de sus sistemas, estructuras y componentes para determinar los elementos que deben ser actualizados y reforzar la seguridad de la instalación, (iii) dejar de operar el reactor RECH-1 y construir un nuevo reactor nuclear de investigación que satisfaga las necesidades presentes y futuras del país garantizando la seguridad de la instalación a través de sistemas, estructuras y componentes

¹VERGARA J., PhD Ingeniería Nuclear del MIT, PUC, menciona que los aportes como valor público de la tecnología nuclear son transversales en las áreas de medicina, agricultura, minería, hidrología, industria y medioambiente.

²El reactor requiere mejoras importantes en su instrumentación nuclear y edificio contenedor por temas sísmicos. El Ciclotrón requiere una actualización mayor dado que ha cumplido su vida útil. Se requiere mejoras en Planta de Irradiación multipropósito que la modernicen sus sistemas de control automático, canastillo de fuentes y elementos exteriores que contienen MCA. Estas son sólo algunas de las mejoras necesarias.

actualizados y, (iv) dejar de utilizar reactores nucleares de investigación para la producción de radioisótopos y para actividades de investigación y desarrollo, siendo reemplazado por un ciclotrón que cumpla las funciones de la plataforma tecnológica actual. Estos cuatro escenarios configuran las unidades mínimas a ser evaluadas.

La evaluación de estas cuatro alternativas no sólo debe ser abordada desde el punto de vista técnico y económico, sino además, se debe evaluar la componente estratégica de cada una de ellas y como posicionarían a la institución y al país de cara a los desafíos futuros. La utilización de un método multicriterio para la toma de decisiones como el AHP permitirá considerar criterios de evaluación de naturaleza diversa más allá de la económica. La evaluación de las cuatro alternativas se realiza en forma integral a partir de la visión de los tomadores de decisión y expertos permitiendo proponer un camino para el desarrollo y continuidad de la energía nuclear en Chile considerando su posicionamiento a nivel regional e internacional.

Los actores que convergen en la pregunta de investigación son multidisciplinarios siendo, por tanto, sus intereses de diversa índole, configurando un escenario complejo. Orgánicamente la CChEN depende del Ministerio de Energía, cuyo interés es la energía nuclear de potencia. Años atrás la CChEN dependió del Ministerio de Minería por la regulación de la explotación de minerales fisionables como uranio y litio. Por otro lado, está relacionada con el Ministerio de Salud y en especial con el Instituto de Salud Pública, debido a la producción Radioisótopos y Radiofármacos para el diagnóstico temprano oncológico. Finalmente hay organismos internacionales que se relacionan con la CChEN como el OIEA (Organismo Internacional de Energía Atómica), con el cual se coopera técnicamente y también la supervisa. El CTBTO (Organización para la no Proliferación de Ensayos Nucleares) se preocupa de vigilar a nivel mundial que no se realicen ensayos de explosiones nucleares. A pesar de la diversidad de los actores la industria nuclear se une en base a un objetivo común que es el uso pacífico de la energía nuclear y a través de su ente fiscalizador principal a nivel mundial que es el OIEA³.

La presentación de los antecedentes y descripción del problema deriva en la siguiente pregunta de investigación: ¿Cuáles son los criterios estratégicos que permitirán evaluar la plataforma de la infraestructura nuclear en forma integral?

La plataforma nuclear de la Comisión Chilena de Energía Nuclear (CChEN) está integrada en parte por algunos de los activos que se pueden apreciar en la Tabla N°1. Estas instalaciones y equipos están alcanzando su vida útil, lo cual es una preocupación permanente de las autoridades, lo que a su vez, podría afectar los compromisos institucionales con el Supremo Gobierno. Esto ha acarreado algunos problemas de stress sobre esta infraestructura que ha conllevado a fallos no planificados generando paradas inesperadas en la maquinaria que han tenido consecuencias económicas y sociales de nivel país. Un ejemplo claro de esto, se produjo en el año 2016 cuando un componente electrónico del Ciclotrón falló, parando

³OIEA: Organismo Internacional de Energía Atómica (<https://www.iaea.org/>)

la generación de radioisótopos y radiofármacos de este tipo, por un periodo no menor. Si bien la tecnología nuclear es utilizada en diversas áreas como la investigación, medicina, agricultura, industria, minería, metrología química y energía, el área más crítica es la medicina nuclear con la provisión de Radioisótopos y Radiofármacos que permiten el tratamiento y diagnóstico de diversas enfermedades. De este proceso productivo los activos más importantes que participan son el reactor nuclear de investigación RECH1, el Ciclotrón y laboratorios de radioquímica.

Tabla 1: Plataforma Nuclear de la Comisión Chilena de Energía Nuclear

Activo	Año de Construcción	Vida Útil*	Estado
Reactor Nuclear de Investigación RECH1	1970	60	En operación
Reactor Nuclear de Investigación RECH2	1980	60	En parada por más de 10 años
Ciclotrón	2000	10	En operación
Planta de Irradiación Multipropósito	1978	60	En operación
Planta de Elementos Combustibles	1985	50	En operación
Laboratorio de Metrología de Radiaciones Ionizantes	2015	60	Puesta a punto
SPEED 2 – generador de plasmas densos transientes	2002	10	En operación

* Las vidas útiles de estos activos son relativas ya que dependen del uso de las instalaciones.

Fuente: varios artículos desde www.cchen.cl (Nuclear, 2016)

1.3 Justificación

Las aplicaciones nucleares de gran escala a nivel mundial requieren de altos estándares de seguridad, niveles de inversión importantes y un capital humano avanzado que permita mantener sus operaciones. Esto genera condiciones adversas para la empresa privada que se traducen en desincentivos para los emprendedores. Dado que el sector privado no está dispuesto a realizar grandes inversiones en el sector nuclear, el mercado chileno de radioisótopos y radiofármacos está concentrado en sólo unos pocos actores: la fundación López Pérez, CGM Nuclear y por otro lado en el sector público, la CChEN. Dado este mercado imperfecto y la decisión de mantener una participación estatal generan una condición mixta público – privada lo que es parte del problema de investigación.

La CChEN a través de su mandato establecido por ley está enfocada en producir y vender productos relacionados con la energía nuclear. La ley de creación de la CChEN es la N° 16.319, la cual fue establecida en 1965. La comercialización radioisótopos y radiofármacos se realiza desde el año 1967 hasta la fecha.

“El objeto de la Comisión será atender los problemas relacionados con la producción, adquisición, transferencia, transporte y uso pacífico de la energía atómica y de los materiales fértiles, fisionables y radiactivos.” (Ley N° 16.319)

A nivel país desde un punto de vista estratégico, la autoridad CChEN, está comprometida y preocupada con el suministro oportuno y seguro de productos y servicios institucionales, lo que se aprecia a través del financiamiento de inversiones como la remodelación de la Planta de Producción y Servicios, la ampliación del Laboratorio de Metrología de Radiaciones Ionizantes, la ampliación de la Planta de Elementos Combustibles y los desarrollo de ingenierías de detalle del Almacén de Desechos Nucleares y la remodelación de los laboratorios anexos a la Planta de Producción de Radioisótopos y Radiofármacos incorporando normas farmacéuticas y GMP⁴ requeridos por el Instituto de Salud Pública. Estos hechos, trascendiendo los periodos presidenciales de gobierno, son ejemplos, de procesos decisionales de autoridades que han entendido el rol productivo, de investigación, desarrollo y regulador de la Comisión Chilena de Energía Nuclear.

Las autoridades de salud pública tienen planes de mejorar la infraestructura de medicina nuclear a través de la implementación de cámaras PET en hospitales. Este equipamiento montado en infraestructura especial permite el diagnóstico preciso y certero del cáncer. Esta iniciativa se alinea con las políticas de tratamiento temprano de enfermedades del Ministerio de Salud generando mejores condiciones de salud para las personas y menores gastos fiscales en el tratamiento de cánceres avanzados.

Presentado los argumentos anteriores surge la necesidad de contar con una claridad en la toma de decisiones. En otras palabras se requiere definir el mecanismo de la evaluación de la inversión fiscal de la plataforma nuclear. La determinación de los criterios estratégicos permite así evaluar las alternativas en forma transparente y objetiva midiendo sus aportes al valor público desde lo social, económico y político sin dejar de lado aspectos técnicos como la seguridad nuclear y la protección radiológica de las personas y el medio ambiente. Los criterios estratégicos son la parte más importante del modelo de decisiones multicriterio, AHP, que sienta las bases de decisiones estructuradas y consistentes tanto en el presente como en el futuro. Es importante tener presente que este tipo de modelos requiere actualizaciones sistemáticas⁵ para mantener su alineación estratégica.

1.4 Objetivos

El Objetivo General de esta tesis es “Determinar los criterios que resultan estratégicos para la CChEN en la evaluación de las alternativas de continuidad operacional de la plataforma tecnológica nuclear institucional, teniendo en cuenta

⁴ GMP: Buenas Prácticas de Manufactura (good manufacturing practice)

⁵Lo recomendado por Profesora Sara Arancibia corresponde a 1 año, cuando las planificaciones estratégicas se actualicen o las autoridades cambien.

factores de nivel país y también globales⁶, que permitan priorizar los escenarios planteados en base a la comparación de parámetros cualitativos y cuantitativos”.

Los Objetivos Específicos son:

- Establecer los criterios de nivel estratégico y nivel técnico que permitan identificar el valor de las alternativas de continuidad operacional de la plataforma nuclear.
- Establecer los mecanismos de medición de cada una de las alternativas de continuidad operacional validados desde el punto de vista experto.
- Realizar una aplicación de prueba⁷ de evaluación de las alternativas de continuidad operacional a través del modelo multicriterio, AHP.
- Analizar los resultados de la simulación del modelo propuesto que permita comprender a los tomadores de decisión las fortalezas y debilidades que presenta cada alternativa.

1.5 Alcance

El resultado de este trabajo es un modelo multicriterio que permite en una fase futura establecer las recomendaciones de toma de decisión en aspectos de inversión en la plataforma tecnológica nuclear administrada por la Comisión Chilena de Energía Nuclear considerando aspectos estratégicos, técnicos y económicos de nivel país como resultado de la aplicación del método multicriterio, AHP. Hay aspectos del modelo que no han sido cubiertos y requieren un mayor desarrollo, como lo es, la evaluación social a través de la determinación de precios sociales de radioisótopos y radiofármacos, también no han sido abordados los instrumentos relacionados con la opinión pública relacionados con el país de origen de la tecnología y la opinión de la autoridad de gobierno de nivel político.

⁶Es importante tener presente el contexto internacional como por ejemplo disponibilidad tecnología de ciclotrones que podría reemplazar un reactor nuclear de investigación en la producción de ciertos radioisótopos y radiofármacos. También es importante tener en cuenta la disponibilidad de uranio para la fabricación de combustible nuclear.

⁷Algunos indicadores debido a la falta de información disponible a la fecha se estimarán con la opinión de expertos (se deja propuesto obtener los valores reales a partir de estudios que requieren inversión)

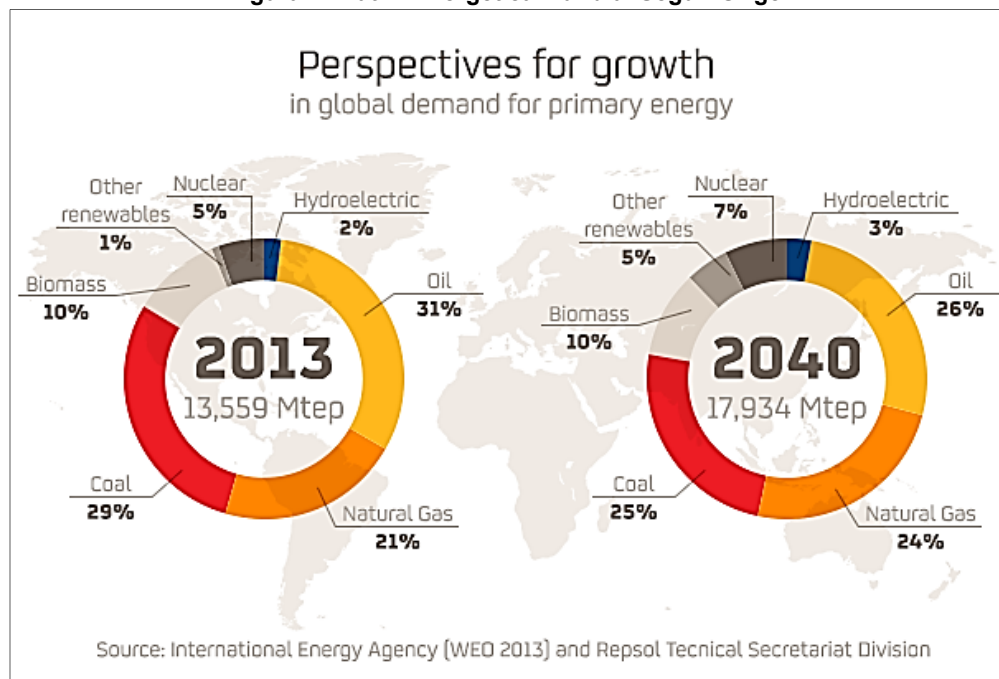
1.5 Antecedentes del caso

1.5.1 El sector nuclear

La tecnología nuclear es aquella que hace uso de la reacción nuclear con algún fin. En el contexto internacional las tecnologías nucleares más importantes son: energía nuclear de potencia, medicina nuclear, armas nucleares y otras aplicaciones.

La energía nuclear de potencia que se utiliza a nivel industrial es aquella que se libera mediante la fisión de un átomo. Su uso a nivel mundial corresponde a un 6% de la matriz energética al 2009 y se espera que este valor aumente. En relación sólo a la generación eléctrica al 2009 se cuenta con un valor del 17% de producción mundial. La utilización de la energía nuclear de potencia puede aplicarse no sólo a la generación eléctrica, sino también, a la producción de agua, calor, hidrógeno y fuerza motriz. Otro potencial importante para su uso es el reemplazo de plantas de potencia de carbón disminuyendo los gases de efecto invernadero y con ello el calentamiento global sin depender de los factores de la naturaleza (energías renovables).

Figura 1: Matriz Energética Mundial Según Origen

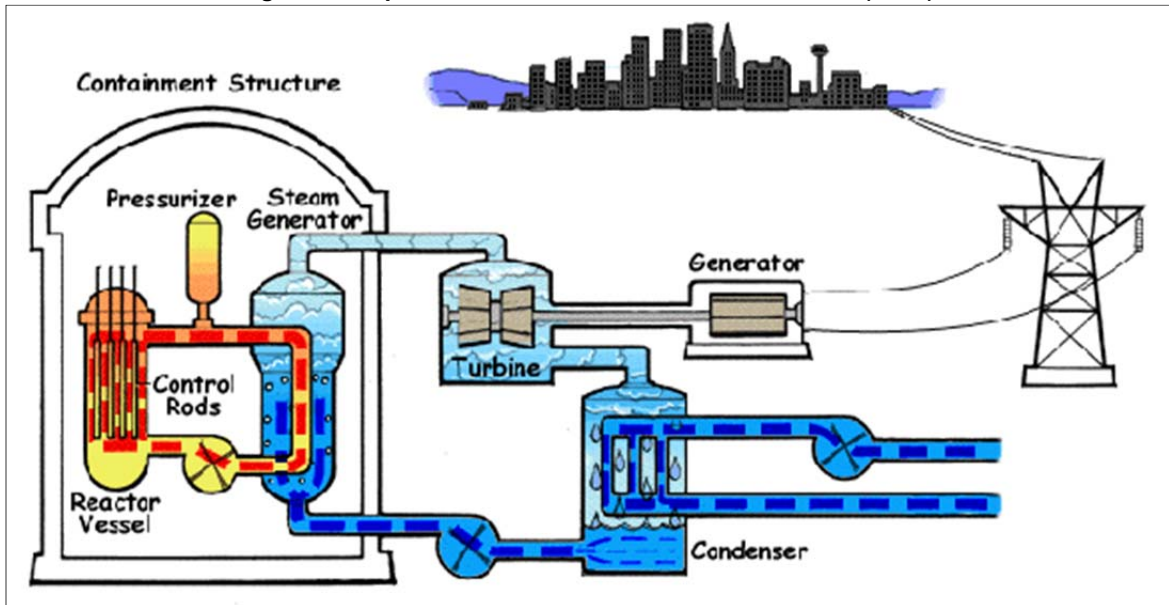


Fuente: Repsol (Technical Secretariat Division REPSOL, 2015)

Un reactor nuclear de potencia es un básicamente intercambiador de calor entre dos circuitos de agua. La tecnología PWR utiliza un primer circuito (primario) que pasa por el núcleo del reactor estando el agua presurizada para evitar su vaporización mejorando de esta forma su eficiencia. Luego el agua del circuito secundario pasa por un intercambiador de calor donde las líneas del primerio se entrelazan con el circuito

primario de agua. El segundo circuito cuenta con agua que es rápidamente vaporizada lo que permite mover las turbinas que generan electricidad.

Figura 2: Esquema de un Reactor Nuclear de Potencia (PWR).



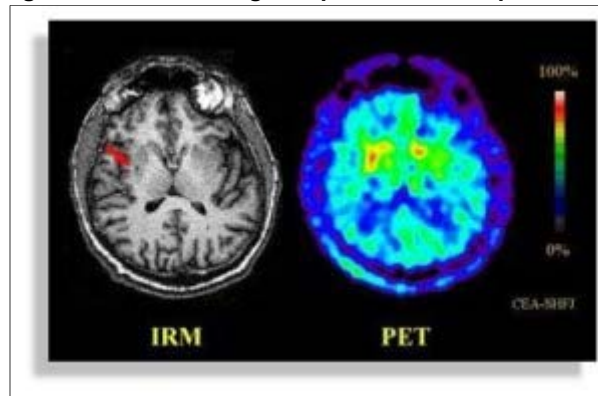
Fuente: (Acelerandolaciencia, 2015)

La tecnología asociada a la medicina nuclear juega un rol muy importante en la prevención de enfermedades de tipo oncológico. En ella se utilizan radiofármacos, los cuales están formados por un fármaco transportador y un isótopo⁸ radiactivo. Estos son incorporados al organismo principalmente por medio intravenosa. De acuerdo al tipo de radiofármaco este se fijará en el órgano que se requiera analizar. Luego se obtiene una imagen a través de un equipo y la imagen es almacenada digitalmente. Estas imágenes permiten un análisis molecular de gran precisión en órganos y tejidos, y tienen la ventaja que son exploratorias y no invasivas.

Más allá del tratamiento y diagnóstico del cáncer se puede utilizar en métodos y evaluación médica de enfermedades cardíacas, gastrointestinales, endocrinas, desórdenes neurológicos y otras.

⁸Los isótopos son átomos de un elemento con un núcleo que tienen una cantidad diferente de neutrones, por ende, diferente masa, pero tienen igual número atómico (Z) pero distinto número másico (A). Hay isótopos naturales los cuales se encuentran en la naturaleza y son estables. Por otro lado hay isótopos artificiales los cuales son fabricados en laboratorios nucleares con bombardeo de partículas subatómicas. Estos últimos son inestables y emiten radioactividad por esto mismo son llamados radioisótopos.

Figura 3: PET o Tomografía por emisión de positrones



Fuente: (Cordero Chaves, 02)

Lamentablemente existe el uso no pacífico de la energía nuclear correspondiendo a aplicaciones militares. Dentro de este uso se encuentra la construcción de armas de ataque, las cuales corresponden a bombas de explosión y el segundo uso corresponde a propulsión, como por ejemplo, los submarinos y portaviones nucleares. Estos logran autonomías de viaje no alcanzables con combustible convencional.

Figura 4: Submarino nuclear Nautilus



Fuente: (energia-nuclear.net, 2016)

Adicionalmente existen otro tipo de usos de la energía nuclear en áreas como la agricultura, la alimentación y aplicaciones medioambientales que son menos masivos que las explicadas anteriormente.

1.5.2 El sector nuclear chileno

Este está constituido por la CChEN y empresas privadas. La Comisión Chilena de Energía Nuclear realiza actividades de regulador, de promoción, de investigación y desarrollo, y de producción en el sector nuclear.

Chile cuenta con dos Reactores Nucleares de Investigación que son propiedad del estado, esto le permite entregar productos y servicios únicos asociados a ellos. Estos productos corresponden a Radioisótopos de vida media que son utilizados en medicina, industria, minería, medio ambiente e investigaciones científicas. De los dos reactores sólo uno se encuentra en operación (RECH1) y el otro se encuentra detenido permanente por más de una década (RECH2).

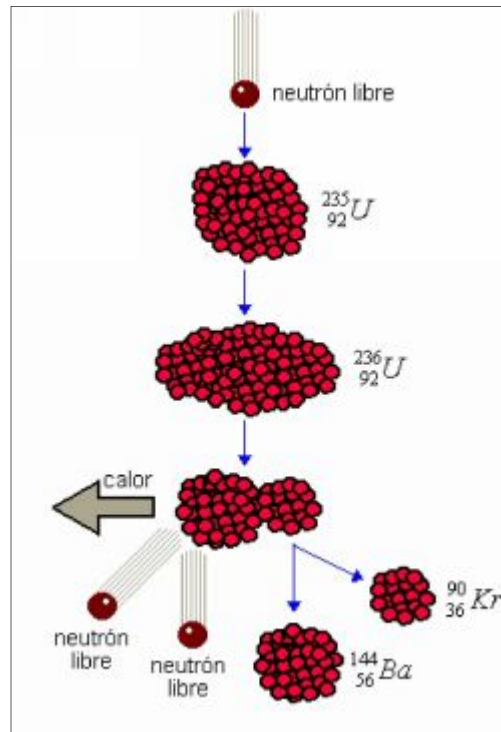
Figura 5: RECH1 reactor nuclear de investigación del CEN La Reina



Fuente: (Nuclear, 2016)

Destaca la técnica de activación neutrónica la cual consiste en exponer un material al flujo neutrónico de un reactor. Diferentes materiales reaccionan de forma diferente absorbiendo o no neutrones. De esta forma se pueden detectar diferentes materiales según su reacción.

Figura 6: Bombardeo de neutrones – Técnica de activación neutrónica



Fuente: (Alvarado Miranda, 2012)

Otro tipo de infraestructura importante en Chile son los Ciclotrones para la producción de Radioisótopos. Un ciclotrón es un acelerador de partículas que permite producir elementos radiactivos artificiales de periodo de semidesintegración corto (dejan de ser radiactivos rápidamente). Estos elementos son utilizados en medicina nuclear asociados a cámaras de Tomografía por Emisión de Positrones (PET).

Figura 7: Ciclotrón Cyclone 18/9

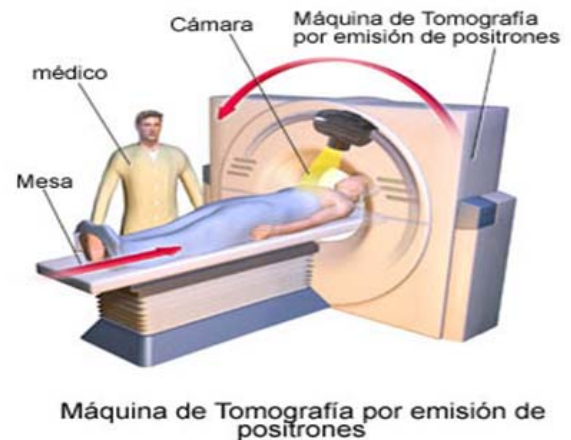


Fuente: (Nuclear, 2016)

Figura 8: Tomografía por emisión de positrones

Tomografía por emisión de positrones (PET).

- ❑ Se inyecta en el cuerpo una sustancia que emite positrones, los cuales son absorbidos por los tejidos del cuerpo.
- ❑ Reacciona con los electrones y emiten rayos gamma que son detectados por cámaras gamma colocadas alrededor del sujeto.



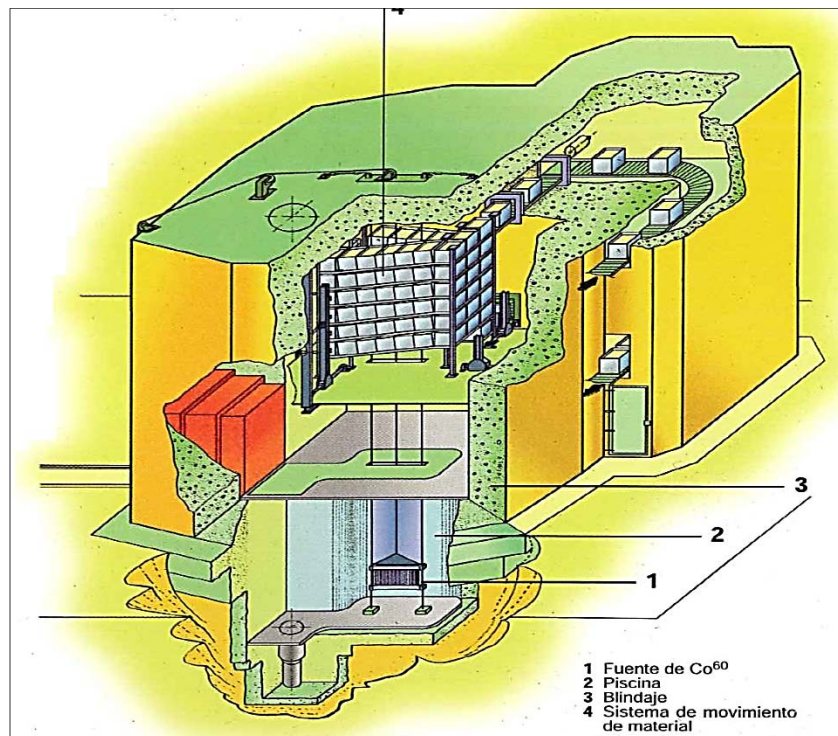
Fuente: (MATA HURIBE & MARÍN HERNÁNDEZ, 2016)

Las cámaras PET aún no se masifican en Chile ya que requieren del escaso radioisótopo del Flúor para poder funcionar y su elevado costo de construcción. En Chile sólo hay dos Ciclotrones para producirlo y un par de cámaras PET en la Región Metropolitana para utilizarlos.

Existe en el mercado chileno una empresa privada importante, CGM Nuclear, quien compite directamente con la CChEN en proveer al mercado chileno de radioisótopos y radiofármacos. Los productos con que esta empresa cuenta están orientados a la medicina nuclear, radioquímicas y otros. Esta empresa utiliza materia prima importada de reactor o ciclotrón la cual es procesada para darle un valor agregado antes de ponerlo a disposición del mercado.

Por otro lado se encuentra el uso de la radiación gamma con propósitos industriales aplicados a productos médicos, materiales, envases, implementos de laboratorio, reducción de carga microbiana o esterilización de materias primas para la industria farmacéutica, insumos de industria de cosméticos, eliminación de patógenos en especias, condimentos, vegetales deshidratados, hierbas, productos del mar y otros.

Figura 9: Esquema de Planta de Irradiación Multipropósito



Fuente: (Nuclear, 2016)

1.5.3 Regulación del Sector Nuclear

Las instalaciones de carácter nuclear y radiológico son especiales ya que manejan material nuclear que puede ser dañino para las personas sino se siguen estrictos protocolos de seguridad y no se dispone de las instalaciones de acuerdo a ciertos requisitos normativos nacionales e internacionales. Esto es un importante factor a tener en cuenta para la toma de decisiones de alternativas de inversión de relevancia estratégica para el país.

1.5.3.1 Regulación Internacional

A nivel internacional Chile ha suscrito diversos tratados que lo mandatan a cumplir toda la normativa internacional de seguridad, uso pacífico, protección física y no proliferación de armas nucleares. El IAEA (International Atomic Energy Agency) brinda asistencia regulatoria, de fiscalización, técnica y económica a los países miembros de esta agencia. Este organismo internacional posee un sólido cuerpo técnico que ha generado normas y recomendaciones internacionales que son mandatorios al momento de tener en cuenta inversiones en el sector nuclear. Existe otros organismos internacionales como el CTBTO (Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization) que se encarga de prohibir los ensayos nucleares mandando a los estados miembros del tratado a pagar cuotas y facilitar terrenos donde instalar estaciones de monitoreo con diferentes tecnologías que permitan verificar el cumplimiento del acuerdo internacional base de esta organización. También existen acuerdos con el DOE (United States Department of the Energy) los cuales han impuesto requisitos especiales de protección física a las instalaciones que permitan los resguardos de los materiales radiactivos sujetos de atentados terroristas. A cambio de la implementación de estos requisitos se financian proyectos en esta materia.

El IAEA está autorizado de acuerdo a su estatuto a establecer estándares de seguridad para la protección de la salud y minimizar el peligro de la vida y verificar la pertinencia de que las actividades de la energía nuclear sean sólo para uso pacífico. Los estándares de seguridad nuclear para los estados miembros sirven para proteger la vida y salud humana y el medio ambiente de los efectos de la exposición a la radiación y servir como evidencia del cumplimiento total de las obligaciones internacionales de los países miembros.

Existe una fuerte complementariedad entre la seguridad nuclear y la protección radiológica. Esta se basa en el principio de la presencia de una fuente nuclear en el entorno de una persona, denominada objetivo, podría potencialmente, en ausencia de medidas de seguridad y protección, dar lugar a la exposición de la persona a la radiación.

Figura 10: Complemento entre seguridad nuclear y protección radiológica



Fuente: (IAEA8, 2016)

A la seguridad nuclear le concierne tanto los riesgos en circunstancias normales como los riesgos como consecuencia de incidentes, así como otras posibles consecuencias directas de una pérdida de control sobre un núcleo de reactor nuclear, una reacción nuclear en cadena, una fuente radiactiva o cualquier otra fuente de radiación. La seguridad nuclear implica la prevención o reducción de la exposición potencial y otros riesgos (minimizar el peligro).

La protección radiológica se preocupa de la prevención o reducción de la exposición a la radiación (protección de la salud) de las personas.

Las diferencias entre ambas áreas se indican a continuación, la seguridad se ocupa principalmente de mantener el control sobre las fuentes, mientras que la protección radiológica se ocupa principalmente de controlar la exposición a la radiación, cualquiera que sea la fuente, para mitigar sus efectos sobre las personas.

La relación entre ambas se concreta estrechamente en que la protección radiológica será mucho más simple si la fuente nuclear y radiactiva se maneja bajo control.

Dado que existen diferentes tipos de radiación la seguridad nuclear incluye la seguridad de las instalaciones nucleares, la seguridad radiológica, la seguridad de la gestión de los desechos radiactivos y la seguridad en el transporte de materiales radiactivos.

1.5.3.2 Regulación Nacional

La Comisión Chilena de Energía Nuclear tiene la responsabilidad de proponer al Supremo Gobierno las leyes y reglamentos necesarios para desarrollar en forma segura, las actividades y utilización pacífica de la energía atómica dictando las normas sobre seguridad nuclear y radiológica.

Se han implementados cuatro reglamentos:

- Reglamento N°3, establece las medidas de protección personal radiológicas y los límites de dosis radiactivas que pueden recibir las personas ocupacionalmente expuestas, con el objetivo de prevenir y evitar la sobreexposición a las radiaciones ionizantes y sus efectos sobre la salud. No se incluyen a las personas que reciban dosis provenientes de la radiación natural o como consecuencia de un diagnóstico o tratamiento médico.
- Reglamento N°12, establece las condiciones que debe cumplir el transporte de materiales radiactivos en todas las modalidades de transporte. Todo transporte de material radiactivo requerirá autorización de la autoridad competente o de otro organismo expresamente facultado.
- Reglamento N° 87, estable los planes de protección física con el objetivo de evitar la retirada no autorizada de materiales nucleares, reducir la posibilidad de que se cometan actos de sabotaje en contra de las instalaciones nucleares y disuadir cualquier intento de cometer algún tipo de acción no autorizada que pudiese poner directa o indirectamente en peligro a las personas, bienes y medio ambiente, proporcionar información y asistencia técnica, en apoyo de las medidas que adopten para localizar y recuperar los materiales nucleares extraviados.
- Reglamento N°133, autorizaciones para instalaciones radiactivas o equipos generadores de radiaciones ionizantes, personal que se desempeña en ellas, u opere tales equipos y otras actividades afines.

1.5.4 Investigación en el área nuclear

Otro factor importante a tener presente en la decisión de inversión es como esta puede ayudar a generar un efecto positivo multiplicador en investigación para áreas existentes o nuevas líneas de investigación que se puedan abrir.

Las áreas de investigación que promueve el IAEA están ordenadas de acuerdo temáticas de aplicación:

- Aplicaciones Nucleares

En esta área podemos encontrar aplicaciones en alimentos y agricultura, salud humana, medio ambiente, recursos hídricos, tecnología de producción de radioisótopos, radiación gamma y ciencia nuclear.

Los aceleradores de partículas son un área importante de desarrollo en el sector nuclear. Se encuentran en este nivel los ciclotrones industriales, ciclotrones de alta energía, sincotrones y otros.

Existen esfuerzos en instrumentación nuclear como el desarrollo de vehículos con instrumentación capaz de generar cartografía que permitan monitorear radiación después de actividades minera o restauración.

Se están realizando importantes esfuerzos en el desarrollo de nuevos diseños de laboratorio de carácter nuclear que optimizan procesos. Este tipo de esfuerzo es conocido en el IAEA como ReNuAL.

En el área de zoonosis se realiza investigación avanzada. Estas técnicas se utilizan para diagnóstico y rápido control de rebrotes de enfermedades como el Ébola (EVE), la gripe aviar (H5N1), la fiebre del valle del Rift y otras.

Se ha avanzado en gestión del suelo, agua y la fitonutrición. Las líneas de investigación en estas áreas se vinculan a la edafología que consideran el desarrollo sostenible (ODS) y actividades de lucha contra el cambio climático. Se hace uso de radionucleídos procedentes de precipitación radiactiva e isótopos estables para medir erosión de suelos y medir la degradación de tierras.

Se han hecho mejoras basadas en TIC en medicina nuclear como aplicaciones que permite contar una estadificación del cáncer rápidamente. La aplicación TNM (tumor, nódulo linfático y metástasis), fue concebida por IAEA con el Tata Memorial Centre del Departamento de Energía Atómica de la India la cual está disponible gratuitamente para móviles. Esta aplicación permite a los médicos la estadificación de canceres en línea y fuera de línea.

Otra área importante de investigación es el empleo de datación de aguas subterráneas con isótopos para cartografiar los recursos hídricos. Esta técnica contribuye al uso cada vez más escaso del agua.

La acidificación de los mares es otra línea de investigación de técnicas nucleares que atienden problemas globales que podrían afectar gravemente la vida humana.

Otra área de impacto a nivel mundial que tiene preocupada a la comunidad de medicina nuclear es la escasez de molibdeno ^{99}Mo isotopo padre del tecnecio $^{99\text{m}}\text{Tc}$. Este corresponde al radioisótopo más utilizado en medicina nuclear en el mundo. Es por esto que existen importantes investigaciones y desarrollos donde se ha

demostrado científicamente la posibilidad de producir ^{99m}Tc con ciclotrones médicos sin uso de uranio enriquecido como lo requieren los reactores nucleares de investigación los cuales a su vez generan una importante cantidad de residuos.

Se destacan técnicas de irradiación utilizadas en Chile para eliminar gérmenes, esterilizar equipo médico, producir vacunas más eficientes, trasplantes de tejidos seguros. También se hace uso de estas técnicas para tratamiento de contaminantes industriales y gases de combustión.

- Energía Nuclear

En el caso de la energía nuclear de potencia, las actividades se concentran en el desarrollo de reactores avanzados a corto plazo. En esta misma línea se profundizó en concepción y diseño de sistemas nucleares innovadores. Se crearon líneas especiales de investigación que abordaron debilidades que se evidenciaron en el accidente nuclear de Fukushima Daiichi como diseño, despliegue, seguridad y regulación de pequeños, medianos o reactores modulares. Otra línea importante de aplicación de reactores nucleares de potencia es la aplicación en usos como desalación de agua del mar, producción, cogeneración de hidrogeno y otras. En relación a mejoras tecnologías existentes se abordan temas de ciclo de combustible y sistemas de energía nuclear sostenibles. La investigación y desarrollo de reactores nucleares basados en fusión, con un potencial energético superior a cualquier tecnología existente, es un esfuerzo continuo conjunto de varios países a nivel mundial para lograr la madurez de esta tecnología para solucionar definitivamente los problemas energéticos a nivel mundial.

- Seguridad y Protección Física

Se pone énfasis en la colaboración, cooperación y creación de capacidades internacionales en seguridad y robustecer el marco de la seguridad nuclear tecnológica u física por medio de actividades nacionales e internacionales.

Se han generado reuniones internacionales que han generado áreas de investigación y desarrollo a la luz del accidente nuclear de Fukushima Daiichi como son la Evaluación y Pronóstico de Respuesta a Emergencias Nucleares y Radiológicas. Hay cuatro informes muy desarrollados que establecen temáticas muy útiles para la comunidad nuclear:

- “IAEA Report on Severe Accident Management in the Light of the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant”
- “IAEA Report on Strengthening Research and Development Effectiveness in the Light of the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant”
- “IAEA Report on Assessment and Prognosis in Response to a Nuclear or Radiological Emergency”
- “IAEA Report on Capacity Building for Nuclear Safety”

EL IRSS o Servicio Integrado de Examen de la Situación Reglamentaria permite hacer evaluación de los órganos regulatorios por medio de autoevaluaciones y exámenes por homólogos.

El área de posible desarrollo en seguridad corresponde a los detectados en liderazgo y la cultura de la seguridad; la experiencia operacional; y la explotación a largo plazo de las centrales nucleares.

En protección radiológica preocupa a los expertos como abordar la protección de las personas en el uso del radón y el suministro de uranio en el futuro.

- Salvaguardias⁹

Esta área tiene una constante preocupación en desalentar la proliferación de armas nucleares mediante la detección temprana del uso indebido de materiales o tecnologías nucleares generando las garantías creíbles en base a las obligaciones de salvaguardias.

1.5.5 Sistema Nacional de Inversiones

Toda inversión del sistema público debe considerar un ex-antes de seguir los protocolos del Sistema Nacional de Inversiones. El problema que atañe a esta tesis no puede dejar de abordar esta temática por las razones que se explican a continuación. Primero podría darse el caso que el proyecto seleccionado por las autoridades y expertos CChEN no considere los filtros que fijan la no factibilidad a los proyectos en el Sistema Nacional de Inversiones. Estos filtros podrían ser parte del modelo multicriterio AHP desarrollado. Segundo, es necesario incluir los criterios que fija el Ministerio de Desarrollo Social para seleccionar proyectos dentro del modelo AHP alineando de esta forma a la selección de proyectos a nivel CChEN con el Ministerio de Desarrollo Social.

El Sistema Nacional de Inversiones (SNI, 2016) es quien dicta las normas y dirige el proceso de inversión en Chile. Su objetivo es contribuir a mejorar la calidad de la inversión pública nacional, asignando los recursos a aquellas iniciativas que generen mayor bienestar social. Para realizar estas evaluaciones se determinan rentabilidad social y económica de acuerdo a estándares técnicos, y en conformidad con lineamientos de las políticas del gobierno.

La normativa vigente obliga a que todas las iniciativas de inversión que se financien con recursos públicos que cuenten con un informe técnico económico del Ministerio de Desarrollo Social.

Por muy técnico que parezca es necesario mencionar lo siguiente. Desde el punto de vista de la Contabilidad Gubernamental se encasillan las iniciativas de

⁹El Departamento de Salvaguardias del OIEA verifica que los materiales nucleares no se desvíen de su uso legítimo con fines pacíficos hacia fines militares

inversión dentro del subtítulo 31. Para el caso de las municipales que se financien iniciativas con transferencias de capital, se utiliza el subtítulo 33. Hasta hace un par de años no era una práctica común el usar los subtítulos que correspondía generando vicios de procedimiento.

El Sistema Nacional de Inversión considera documentalmente: metodologías, normas y procedimientos. Todos los proyectos o iniciativas de inversión deben pasar por las siguientes etapas: formulación, ejecución y evaluación. El sistema está compuesto por los siguientes subsistemas: evaluación ex ante, evaluación ex post, formulación presupuestaria y ejecución presupuestaria

2. Marco Conceptual

La toma de decisiones en el sector nuclear se asocia principalmente a la incorporación de reactores nucleares de potencia en una nación junto con toda la infraestructura que permita su operación en forma segura.

La toma de decisiones también es modelada por los eventos históricos que han afectado a esta industria tal como lo señala el “Global Europe Anticipation Bulletin” en su documento “After Fukushima” (GEAB, 2016). Este documento señala que en los años 50 las decisiones de implementación de programas nucleares eran realizadas por técnicos y eran implementadas por la fuerza. En los 70 aparecen los primeros movimientos verdes opositores a la energía nuclear, pero a pesar de esto, países como Francia y Japón cubren sus territorios con reactores nucleares de potencia. En los años 80, ocurre el accidente de Chernóbil, produciéndose uno de los primeros debates serios en contra de la energía nuclear, primando finalmente la visión técnica. En el mismo instante de tiempo, pero en otros países como Alemania, Finlandia, e Italia, se instala la visión antinuclear. En el mismo momento en Estados Unidos ocurre el accidente de Three Mile Island, donde la industria petrolera aprovechando la situación margina a la energía nuclear como una estrategia de competencia. En el 2000 nuevamente surge el debate del incremento en el uso de la energía nuclear dadas las necesidades energéticas y el uso como una alternativa limpia en comparación a las tecnologías basadas en carbón. En el año 2011 ocurre el accidente nuclear de Fukushima, el cual produce un efecto contrario al sector nuclear. Según opinión experta se espera que los programas nucleares estén detenidos hasta 2020. En esta década los debates se centraran en temas de seguridad y emisiones de CO₂, pero sin tomar decisiones a favor de la energía nuclear, salvo en aquellos países donde esta es más vertical como lo son los países orientales.

El Organismo Internacional de Energía Atómica ha liderado la producción de literatura y reglamentación en relación a la implementación de programas nucleares. Se destacan las siguientes publicaciones al respecto:

- El IAEA¹⁰ considera que el uso de un Reactor Nuclear de Potencia requiere necesariamente el desarrollo de un programa nuclear de potencia. Este recomienda seguir en forma obligatoria una serie de pasos en diferentes aspectos. Estas etapas son abordadas en el documento “Milestones in the Development of a National Infrastructure for Nuclear Power”, NG-G-3.1, (IAEA3 Nuclear Energy Series, 2015).
- Se puede encontrar otra metodología de toma de decisiones, denominada INPRO. Esta metodología busca el desarrollo de un sistema nuclear de potencia (NES: Nuclear Energy System) que sea sostenible en el tiempo donde se definen criterios en diferentes áreas que deben ser cumplidos (IAEA2 Nuclear Energy Series, 2014).

¹⁰ International Atomic Energy Agency

- “A Framework for an Integrated Risk Informed Decision Making Process” (IAEA10 - INSAG-25, 2011). Este informe presenta un marco, denominado "toma de decisiones integrada y basada en el riesgo" (IRIDM). IRIDM es un proceso sistemático dirigido a la integración de las principales consideraciones que influyen en la seguridad de las centrales nucleares. El principal objetivo de IRIDM es asegurar que cualquier decisión que afecte a la seguridad nuclear se optimice sin limitar indebidamente la conducción de la operación de la central nuclear. Apoya las decisiones en materia de seguridad nuclear y garantiza la coherencia con las metas de seguridad del Estado miembro.

2.1 Hitos en el desarrollo de una infraestructura para el uso de la potencia nuclear

Un programa de energía nuclear es un proyecto estratégico de nivel país que requiere una cuidadosa planificación, preparación e inversión de tiempo, instituciones y recursos humanos. Si bien la energía nuclear no es la única de nivel estratégico, es diferente debido a los requisitos de seguridad, protección y salvaguardias asociados con el uso de materiales nucleares.

La decisión de iniciar un programa nuclear de potencia debe basarse en el compromiso de utilizar la energía nuclear de manera segura, debidamente resguardada y pacífica. Este compromiso requiere el establecimiento de una infraestructura nacional sostenible que brinde apoyo gubernamental, legal, regulatorio, gerencial, tecnológico, de recursos humanos, industrial y de las partes interesadas para el programa de energía nuclear a lo largo de su ciclo de vida. La demostración del cumplimiento de los instrumentos jurídicos internacionales, las normas de seguridad nuclear internacionalmente aceptadas, las directrices de seguridad nuclear y los requisitos de salvaguardias, es esencial para establecer un programa de energía nuclear responsable.

La infraestructura requerida incluye no sólo instalaciones y equipos, sino también los recursos humanos y financieros, el marco legal y regulatorio dentro del cual se llevará a cabo el programa. Esencialmente, se necesita la misma infraestructura, ya sea que el programa esté previsto para la producción de electricidad, como para la desalación del agua de mar o para cualquier otro fin pacífico.

La experiencia ha demostrado que considerar inicialmente los 19 temas de infraestructura de esta metodología, facilita el éxito de un programa de energía nuclear. Una atención insuficiente a cualquiera de ellos puede comprometer la seguridad o provocar atrasos costosos o incluso fallas en el proyecto. Esta metodología requiere que en un país que contempla la introducción de la energía nuclear debe contar con un entorno político, económico y social estable.

Los tiempos involucrados en un programa nuclear de potencia son muy grandes. Cada planta nuclear involucra periodos de tiempo de alrededor de 100 años, lo cual incluye la construcción, la operación, el decomisionamiento y la gestión de desechos.

Se estima que desde que un país considera el inicio de la opción nuclear y desarrolla su primera planta nuclear de potencia pasan entre 10 a 15 años. La variación de este tiempo está relacionada con los recursos que se dispone para el desarrollo del programa. El contexto social, político y cultural influye en los tiempos de desarrollo del programa.

El uso de material nuclear requiere especial desarrollo de los aspectos en seguridad nuclear, la protección física y las salvaguardias¹¹. La responsabilidad de uso de material nuclear no sólo afecta en los ciudadanos del país sino que involucra a la comunidad regional e internacional. Otro aspecto a desarrollar es la legislación nacional que debe prepararse para manejar situaciones que involucran instalaciones nucleares de plantas de potencia y en esta misma línea el país debe someterse a todos los acuerdos internacionales que regulan este sector constituyendo esta última parte la legislación nuclear internacional.

Esta metodología se puede asociar al desarrollo de infraestructura necesaria para llevar a cabo un programa la cual se puede dividir en tres fases. La duración del tiempo de cada una de ellas depende de los niveles de compromisos formales firmados por las autoridades políticas y los recursos dispuestos por el país.

Las tres fases en el desarrollo de la infraestructura necesaria para soportar un programa nuclear se muestran en la tabla que se muestra a continuación

Tabla 2: Fases de la implementación de un programa nuclear

Fase	Descripción
1	Consideraciones tomadas antes de la decisión de lanzar un programa nuclear de potencia
2	Trabajo preparatorio para los contratos y construcción de una planta nuclear de potencia después que la decisión política ha sido tomada
3	Actividades para implementar la primera planta nuclear

Fuente: IAEA (IAEA3 Nuclear Energy Series, 2015)

Cada vez que se cumple cada una de estas fases un hito debe ser alcanzado y una decisión de moverse a una siguiente fase debe ser tomada. Los hitos a alcanzar son:

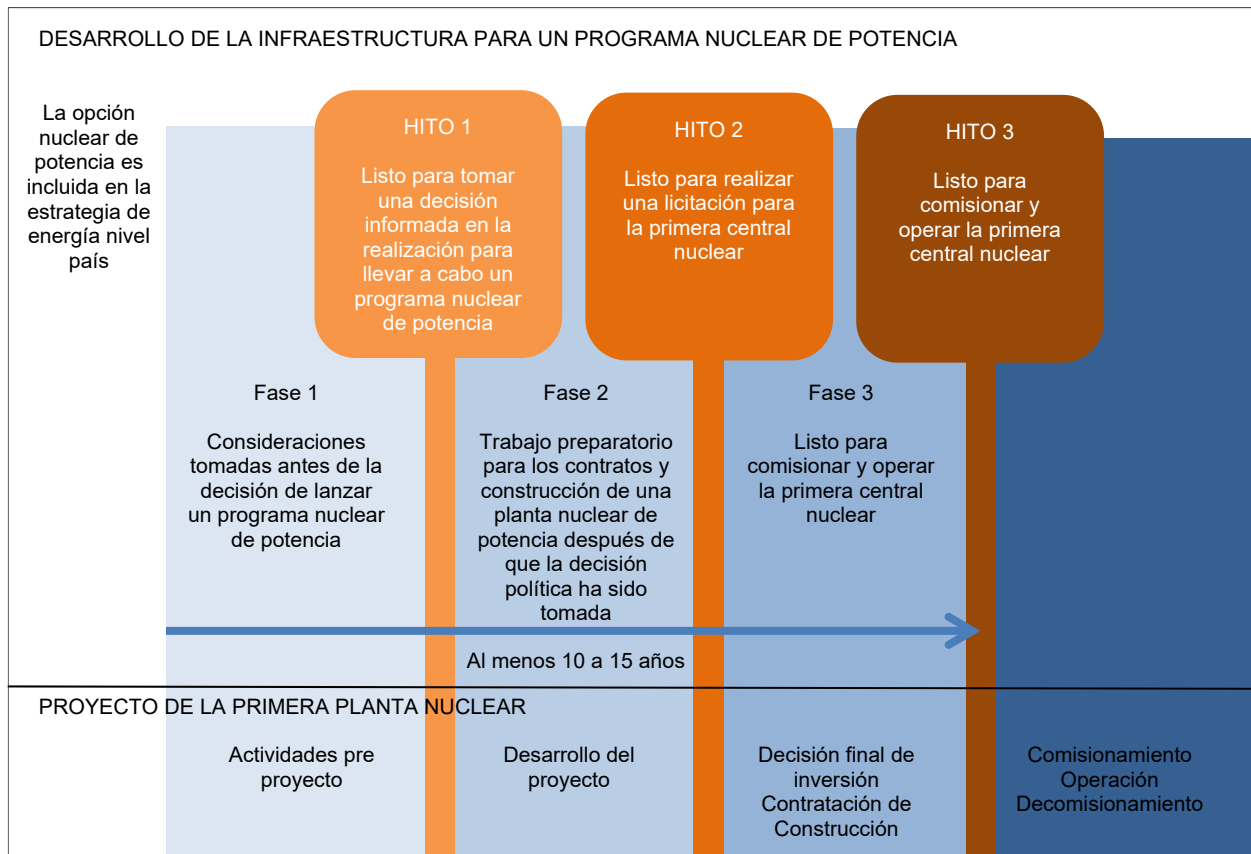
Tabla 3: Tabla de hitos a alcanzar por fases de un Programa Nuclear

Hito	Descripción
1	Listo para tomar una decisión informada en la realización para llevar a cabo un programa nuclear de potencia
2	Listo para realizar una licitación para la primera central nuclear
3	Listo para comisionar y operar la primera central nuclear

Fuente: IAEA (IAEA3 Nuclear Energy Series, 2015)

¹¹El Departamento de Salvaguardias del OIEA verifica que los materiales nucleares no se desvíen de su uso legítimo con fines pacíficos hacia fines militares

Figura 11: Representación esquemática de las fases e hitos de un programa nuclear



Fuente: IAEA (IAEA3 Nuclear Energy Series, 2015)

2.2 Evaluación sostenible de los sistemas de la energía nuclear

Con la metodología INPRO (evaluación sostenible de los sistemas de la energía nuclear), la infraestructura nuclear puede ser definida como una colección de capacidades de instituciones nacionales para lograr en el largo plazo un programa nuclear exitoso. La metodología INPRO define una serie de medidas a ser tomadas por esas instituciones nacionales como: el establecimiento de un marco legal, por ejemplo, la ley nuclear y el cuerpo regulatorio nuclear correspondiente, la selección de un sitio apropiado para las instalaciones nucleares y la creación de una industria local que soporte la operación. Dos aspectos para lograr esta infraestructura nuclear destacan: la aceptación pública y los recursos humanos necesarios para la construcción y la operación.

El establecimiento o la mejora de la infraestructura necesaria para un programa nuclear requiere tiempo y esfuerzo y, por lo tanto, es poco probable que se inicien acciones para este fin hasta que la planificación del sistema energético haya identificado claramente la energía nuclear como una opción de suministro de energía

(adicional) que debería considerarse seriamente. Por lo tanto, la discusión de las necesidades de infraestructura también involucra en ocasiones una discusión de la planificación del sistema energético, ya que, al menos en las primeras etapas de la planificación, la planificación de la infraestructura y la planificación del sistema energético son actividades interdependientes. Por ejemplo, la planificación del sistema energético, cuando se considera aisladamente de la infraestructura, puede indicar que una Planta Nuclear debe entrar en operación dentro de un marco de tiempo relativamente corto. Sin embargo, para asegurar que la infraestructura (existente o planificada) es adecuada para operar con seguridad, especialmente para la primera central nuclear, se necesita un tiempo significativamente largo. Por lo tanto, el proceso de planificación del sistema energético no puede ser completado sin considerar el proceso de planificación de la infraestructura relacionada.

A continuación, se presentan los requisitos de usuario (UR) en un área de infraestructura:

- Consideraciones legales e institucionales (UR1)
- Consideraciones industriales y económicas (UR2)
- Soporte político y de aceptación pública (UR3)
- Recursos Humanos (UR4)
- Minimización de infraestructura (UR5)
- Acuerdos regionales e internacionales (UR6)

Esta metodología se hace cargo del desarrollo sostenible entendido como aquel desarrollo presente que no comprometerá el desarrollo de futuras generaciones. Esta declaración significa que se debe pasar un test de sostenibilidad: (1) El desarrollo actual debe ser adecuado para satisfacer las necesidades actuales minimizando los impactos ambientales y una economía aceptable; (2) Los programas de investigación y desarrollo actuales deben establecer y mantener tendencias que conduzcan a desarrollos tecnológicos e institucionales que sirvan de plataforma para que las generaciones futuras puedan satisfacer sus necesidades; (3) El enfoque para satisfacer las necesidades actuales no debe comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades.

En el manual metodológico INPRO se examina cada punto clave del sistema energético nuclear. La estructura de esta metodología es jerárquica compuesta por principios básicos (BP), requerimientos de usuario (UR), criterios específicos (CR) y medidas considerando un nivel mínimo. Cada criterio tiene medida que tienen en consideración los test de sostenibilidad descritos anteriormente.

A continuación se muestra una tabla resumen de la metodología INPRO:

Tabla 4: Resumen del principio básico, requerimientos de usuario y criterios en la metodología INPRO

Principio básico de infraestructura: un país debe estar habilitado para adoptar, mantener o incrementar un sistema nuclear energético para que suministre energía y productos relacionados sin crear una excesiva inversión o infraestructura nacional		
Requerimientos de usuario	Criterio	Indicador (IN) y límite de aceptación pública (AL)
UR1: Infraestructura legal e institucional Debe establecerse un marco jurídico adecuado que abarque cuestiones de responsabilidad nuclear, seguridad y protección radiológica, protección del medio ambiente, control de la operación, gestión de desechos y clausura, seguridad y no proliferación	CR1.1: Aspectos Legales	IN1.1: Estatus del marco legal AL1.1: El marco legal ha sido establecido de acuerdo con los estándares internacionales
	CR1.2: Instituciones	IN1.2: Estatus de las organizaciones gubernamentales con responsabilidad de la seguridad, protección radiológica, control de operación, gestión de desechos y desmantelamiento, preparación de emergencias y respuesta, seguridad y no proliferación de armas nucleares AL1.2: Las organizaciones del estado han sido establecidas de acuerdo con los estándares internacionales
UR2: Infraestructura industrial y económica La infraestructura industrial y económica de un país con una Sistema de Energía Nuclear (NES) debería ser adecuada para apoyar el proyecto durante toda la vida útil del programa de energía nuclear, incluyendo la planificación, construcción, operación, desmantelamiento y actividades relacionadas con la gestión de desechos	CR2.1: Financiamiento de infraestructura	IN2.1: Financiamiento necesario para la infraestructura de un programa nuclear de potencia AL2.1: Suficiente disponibilidad de cobertura de programa nuclear de potencia
	CR2.2: Tamaño de las instalaciones nucleares	IN2.2: Tamaño de la instalación nuclear AL2.2: De acuerdo a necesidades locales
	CR2.3: Emplazamiento	IN2.3: Proceso de emplazamiento de la instalación nuclear AL2.3: El proceso de emplazamiento ha sido llevado en forma segura considerado la protección física y cumpliendo la legislación nacional e internacional ambiental
	CR2.4: Infraestructura soportante	IN2.4: Disponibilidad de infraestructura para soportar al dueño y/o operador AL2.4: Disponibilidad interna o externa
	CR2.5: Valor agregado	IN2.5: Valor agregado de un programa nuclear de potencia a la sociedad AL2.5: Valor agregado mayor que la inversión del gobierno necesaria para soportar el programa nuclear
UR3: Soporte político y de aceptación pública Medidas adecuadas deben ser tomadas para lograr y mantener la aceptación pública de un plan de un NES ¹² y su operación para lograr el compromiso político para sostener el desarrollo y operación del sistema	CR3.1: Información Pública	IN3.1: Información proveída al público AL3.1: Suficiente de acuerdo a los requisitos nacionales y teniendo en cuenta las prácticas internacionales
	CR3.2: Participación Pública	IN3.2: Participación pública en el proceso de decisión de un programa nuclear de potencia AL3.2: Suficiente apoyo de acuerdo a los requerimientos nacionales y tomando en cuenta las prácticas internacionales
	CR3.3: Encuesta de aceptación pública	IN3.3: Aceptación pública de un programa nuclear AL3.3: Suficiente para esperar que el riesgo político de soportar un programa nuclear de potencia es aceptable.
	CR3.4: Soporte político	IN3.4: Lineamiento de política gubernamental del programa nuclear

¹² NES: Nuclear energy system

Principio básico de infraestructura: un país debe estar habilitado para adoptar, mantener o incrementar un sistema nuclear energético para que suministre energía y productos relacionados sin crear una excesiva inversión o infraestructura nacional		
Requerimientos de usuario	Criterio	Indicador (IN) y límite de aceptación pública (AL)
		AL3.4: La política soporta un programa nuclear
	CR3.5: Ambiente político y riesgo de inversión	IN3.5: Acuerdo de largo plazo para el programa nuclear de potencia AL3.5: Acuerdo suficiente para habilitar el retorno de la inversión
UR4: Recursos Humanos Los recursos humanos necesarios deben estar disponibles para que las partes involucradas en el programa nuclear de potencia logren la seguridad, la protección física, y la operación económica de un NES durante toda su vida	CR4.1: Recursos Humanos	IN4.1: Disponibilidad de recursos humanos adecuados para establecer y operar una NES AL4.1: Acuerdo suficiente en razón de la experiencia internacional
UR5: Minimización de Infraestructura La NES debe ser diseñada para minimizar la infraestructura para el programa nuclear de potencia	CR5.1: Personal	IN5.1: Recursos humanos necesarios para operar, mantener y desmantelar un reactor nuclear de potencia AL5.1: Monto en recursos humanos se reduce en comparación con instalaciones existentes
	CR5.2: Prefabricación de componentes	IN5.2: Extender prefabricación de componentes AL5.2: La extensión se incrementa en comparación a una instalación existente.
UR6: Acuerdos regionales e internacionales Acuerdos regionales e internacionales deben proveer opciones para habilitar al país con un NES que minimice la infraestructura para un programa nuclear de potencia	CR6.1: Opciones para reducir la infraestructura nacional e internacional	IN6.1: ¿Existen acuerdos regionales e internacionales para reducir la infraestructura institucional? AL6.1: Si
	CR6.2: Opciones para reducir la infraestructura industrial	IN6.2: ¿Existen acuerdos regionales o internacionales para reducir la infraestructura industrial? AL6.2: Si
	CR6.3: Opciones para reducir la infraestructura socio política	IN6.3: ¿Existe acuerdos nacionales e internacionales para reducir la infraestructura socio política? AL6.3: Si
	CR6.4: Opciones para reducir los recursos humanos	IN6.4: ¿Existen acuerdos regionales o internacionales para reducir los recursos humanos? AL6.4: Si

Fuente: IAEA (IAEA2 Nuclear Energy Series, 2014)

Esta metodología permite evaluar y presentar el estado del avance de un programa nuclear de potencia, desde un punto de vista muy amplio desarrollado por la experiencia internacional de los países miembros representados en el IAEA¹³. En la tabla presentada se establece un valor de corte para cada uno de los criterios dados. Muchos de estos criterios vuelven a aparecer en el árbol jerárquico del modelo desarrollado en esta tesis.

2.3 Un enfoque de riesgos para la toma de decisiones

Este enfoque es conocido por sus siglas en inglés IRIDM, "Integrated Risk Informed Decision Making". El cuál fomenta un equilibrio entre las miradas

¹³ International Atomic Energy Agency

determinísticas, análisis probabilísticos y otros factores a fin de lograr un proceso integrado en la toma de decisiones que sirva de forma óptima para garantizar la seguridad de los reactores nucleares.

IRIDM depende de la integración de una amplia variedad de información y perspectivas, así como del compromiso de los diseñadores, operadores y autoridades reguladoras de utilizar la información de riesgo en sus decisiones.

Uno de los objetivos en la seguridad nuclear es proteger a las personas y el medio ambiente de los riesgos de la radiación ionizante. El IAEA ha divulgado los principios fundamentales y requerimientos de seguridad que se hacen cargo de las consideraciones para manejar los riesgos de la seguridad nuclear (visión probabilística) y análisis exhaustivos de seguridad nuclear convencional (visión determinística). Ambas visiones están alineadas con el marco de trabajo de IRIDM. En particular, los principios fundamentales de seguridad relacionados con la autoridad legal, líderes y gerentes de seguridad, justificación de instalaciones y actividades, optimización de la protección, limitación de los riesgos individuales, prevención de accidentes, y preparación de emergencias y respuesta pueden ser abordados usando IRIDM.

IRIDM es un proceso sistemático dirigido a la integración de la mayor cantidad de elementos que puedan influir en la seguridad de una planta nuclear. El mayor éxito de IRIDM es asegurar que cualquier decisión que afecte la seguridad nuclear deba ser considerada y abordada optimizándola al máximo sin tener presente los límites que nos presenta una operación normal en una planta nuclear.

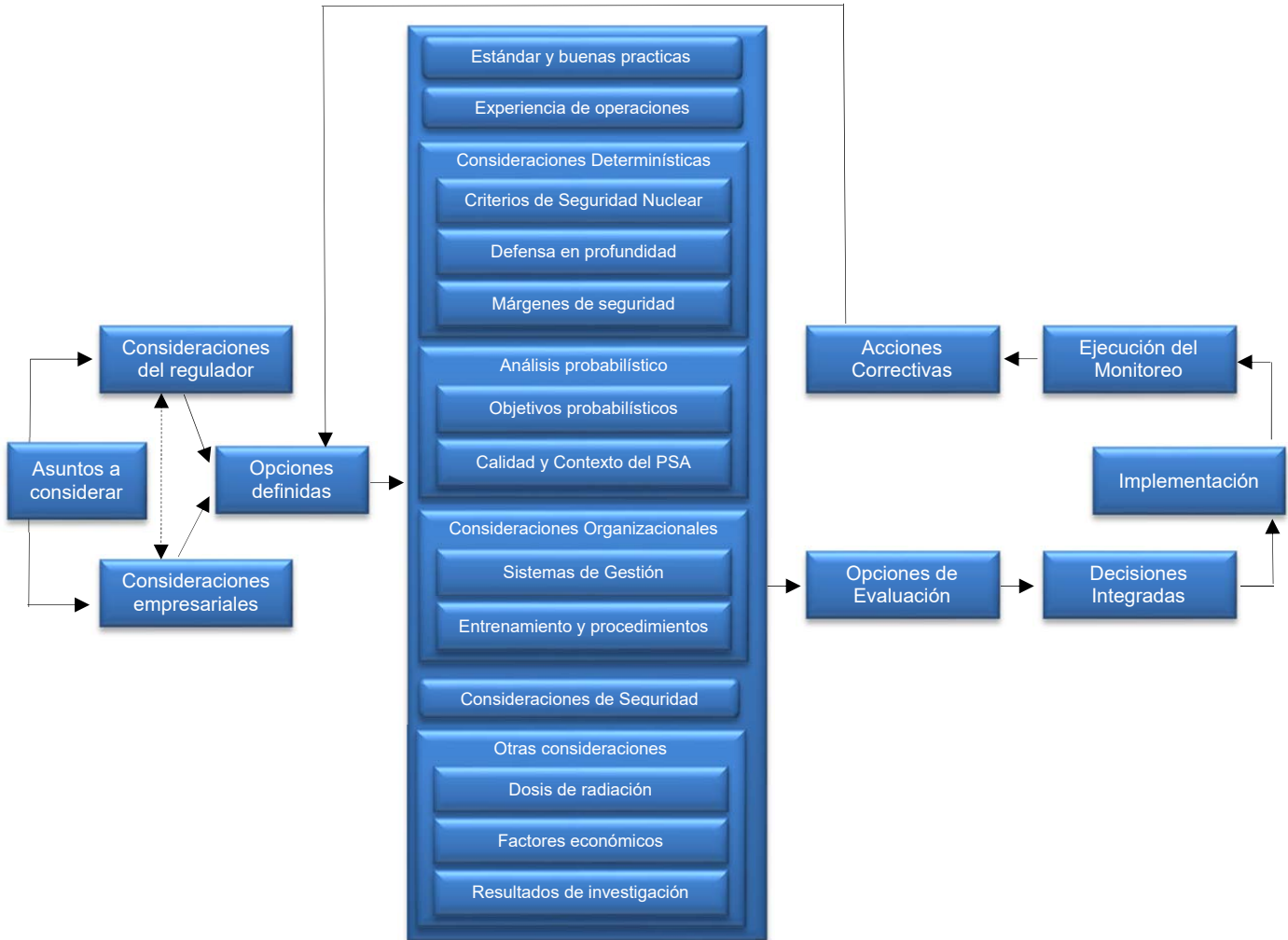
IRIDM debe satisfacer los siguientes principios:

- Mantener la defensa en profundidad¹⁴.
- Mantener los márgenes de seguridad¹⁵.
- Tomar en cuenta las buenas prácticas de ingeniería y organización.
- Tomar en cuenta el conocimiento adquirido a partir de la experiencia de operación, investigación y desarrollo, y el estado del arte en estas metodologías.
- Asegurar la adecuada integración entre la seguridad nuclear y la protección física.
- Satisfacer las regulaciones más relevantes.

¹⁴ La defensa en profundidad se refiere al uso de diferentes barreras de seguridad entre las personas y la fuente radiactiva. Esto permite soportar fallos en algunas de las barreras y aún mantener la seguridad del sistema.

¹⁵ Tiene que ver con mantener las condiciones de operación bajo los límites de diseño de los sistemas.

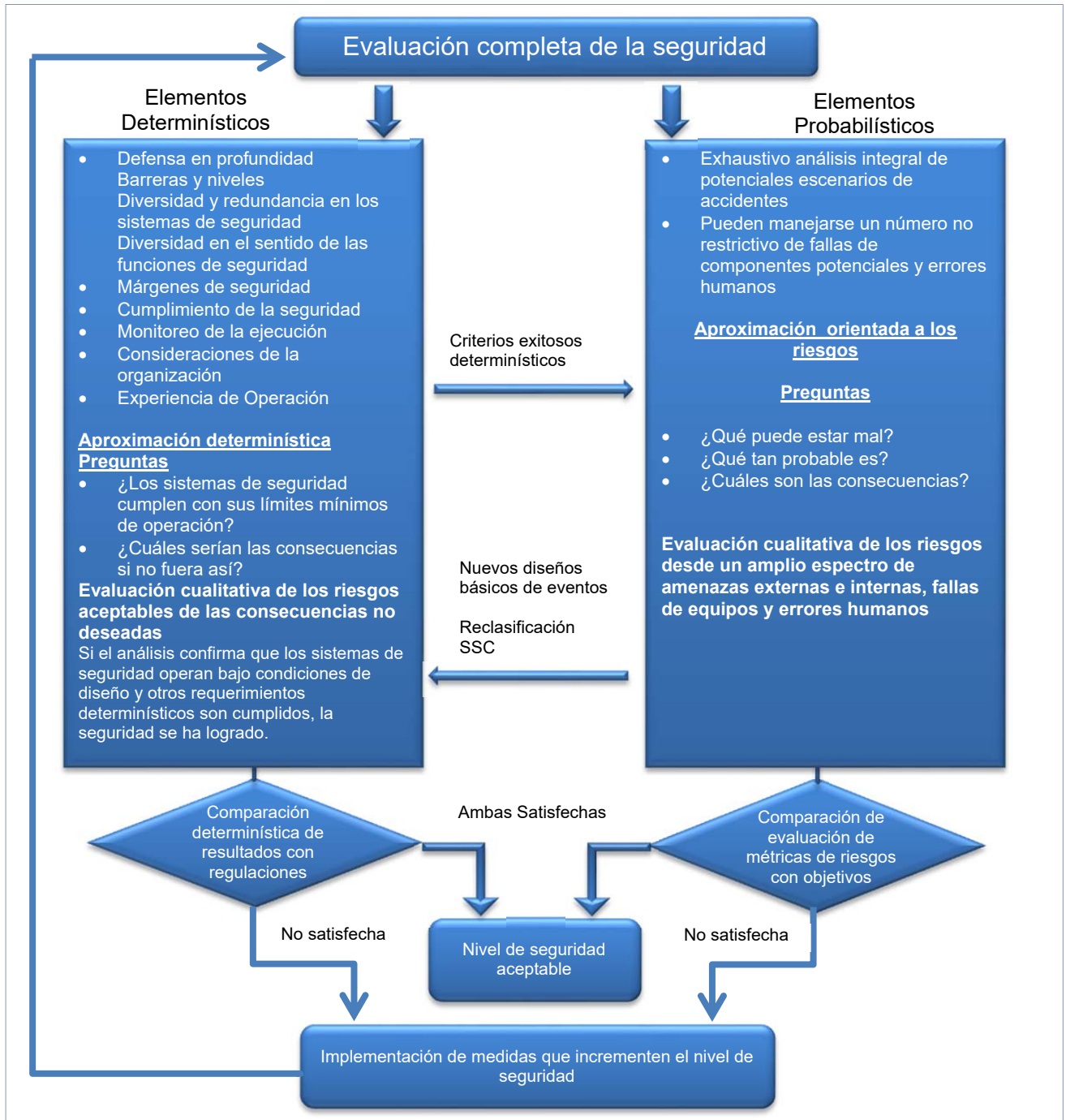
Figura 12: Elementos claves en el proceso integrado de toma de decisiones con gestión de riesgos



Fuente: (IAEA10 - INSAG-25, 2011)

Dependiendo de la naturaleza y el propósito de la decisión, y el tiempo en el cual debe ser tomada, algunos o todos estos elementos deben ser evaluados. Claramente, mientras más información sea considerada, mejores decisiones serán ejecutadas, cumpliendo los objetivos del modelo.

Figura 13: Integración de elementos determinísticos y probabilísticos de IRIDM



Fuente: (IAEA10 - INSAG-25, 2011)

La figura anterior muestra la integración de los elementos determinísticos y probabilísticos del proceso IRIDM, el cual busca lograr un alto nivel de seguridad nuclear. Como se muestra en esta figura los elementos son parte de un proceso iterativo que se reinicia en la toma de decisiones de seguridad. El proceso puede resultar en un diseño básico de los elementos o nuevos criterios determinísticos de seguridad de clasificadores de SSC¹⁶.

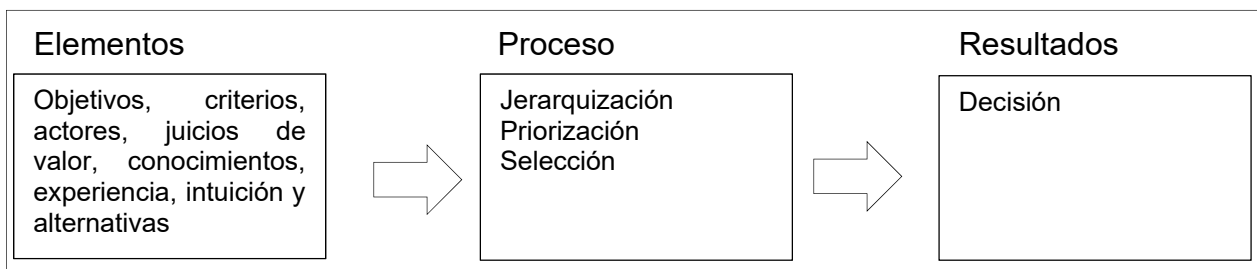
¹⁶Systems, structures or components.

3. Marco Metodológico

3.1 Toma de Decisiones

La forma en la cual se toman decisiones implica la comparación entre alternativas sobre las cuales se debe elegir. El problema se divide en primera instancia en sus elementos, para luego compararlos para realizar una elección. Para poder realizar la elección se debe medir aquello que se desea comparar estableciendo preferencias entre los criterios formando jerarquías. A continuación se puede ver el esquemáticamente el proceso de la toma de decisiones:

Figura 14: Proceso de Toma de Decisión General



Fuente: (Arancibia , Contreras, Mella, Torres, & Villablanca, 2006)

La toma de decisiones tiene diferentes formas de ser abordada. Una de ellas considera una visión teórica y otra práctica. La primera identifica criterios estratégicos, restricciones variadas, indicadores cuantitativos y cualitativos, modelamiento de preferencias de los tomadores de decisión e integración de modelos deterministas y aleatorios. Desde el punto de vista práctico se consideran en cuenta las formas de inversión en el sector público mediante el establecimiento de rankings que permiten priorizar.

Las formas tradicionales de toma de decisiones de inversiones en el sector público son realizadas en base a la evaluación social de proyectos que recopila información económica basada en precios sociales. Para poder decidir se utilizan herramientas financieras como el VAN (Valor actualizado Neto), Costo-Beneficio, o el análisis Costo-Eficiencia. Sin embargo, existen otros criterios que son capaces de considerar otros elementos cualitativos que no considera la evaluación de proyectos tradicional.

Las variables utilizadas en evaluación de proyectos son cuantitativas de tipo monetarias. Para poder realizar un análisis de decisión que considere otras dimensiones distintas a las económicas se deben utilizar criterios no tradicionales y específicamente para el sector nuclear criterios como la seguridad nuclear, protección radiológica, emplazamiento, ambientales, aspectos sociales, aportes a la investigación y políticos. Adicionalmente a esto, se puede decir, que hoy en día los gobiernos democráticos han incorporado procesos decisionales participativos que incorporan diferentes actores relevantes de la sociedad. Estos grupos son multidisciplinarios por lo cual tienen distintos intereses. Los métodos multicriterio permiten manejar la situación

multidisciplinaria y representan una forma de complementar la evaluación de proyectos tradicionales.

La aplicación del análisis multicriterio puede realizarse en algunas fases del ciclo de vida de un proyecto como idea, perfil, prefactibilidad y factibilidad. Se deja de lado la fase de ejecución ya que no es necesario. En la fase de idea de un proyecto se puede incorporar criterios obtenidos desde la misión u objetivos, ordenándose las ideas de proyectos de acuerdo al método multicriterio que permita implementar una línea de corte o selección. Luego, cuando las alternativas ya se encuentran definidas y caracterizadas (perfil), se puede aplicar nuevamente la evaluación multicriterio. En esta fase del ciclo de vida del proyecto se recomienza integrar a las unidades más operativas para evitar conflictos posteriores.

Es muy importante contar una visión clara de los actores involucrados. Esta visión debe obtenerse con una mirada del antes y del después de realizar el proyecto. De ser posible sería importante contar con su participación. Esta participación implica tener presente el capital social en la zona donde se realizará la intervención de manera de potenciarlo y no por el contrario. Además, debe considerarse el capital construido (infraestructura), el capital natural y el capital humano. En el análisis de actores se debería considerar los siguientes pasos:

1. Identificar involucrados
2. Clasificar involucrados
3. Definir para actor
 - a. Posición
 - b. Fuerza
 - c. Intensidad del actor
4. Comprar alternativas
5. Generar estrategias

3.2 Mecanismos de selección de alternativas

Los mecanismos de elección de opciones se pueden organizar en dos grupos según la cantidad de objetivos

- Métodos simples: tienen un solo objetivo
- Métodos complejos: tienen varios objetivos

Por otro lado cada uno de estos se agrupan en:

- Métodos cuantitativos: usan una realidad estática y objetiva revisando las relaciones entre variables cuantitativas.
- Métodos cualitativos puros: se preocupan de las relaciones entre variables cualitativas. Entregan datos de juicios, actitudes o deseos los cuales son

obtenidos desde encuestas, observaciones, dinámicas de grupo, entrevistas o técnicas proyectivas.

- Métodos Mixtos: recolectan, analizan y vinculan datos de tipo cualitativo y cuantitativo.

Tabla 5: Resumen de Metodos de Selección de Alternativas en la Toma de Decisiones

	Métodos simples Un solo objetivo	Métodos complejos Múltiples objetivos
Métodos Cuantitativos	Indicadores económicos (VAN, TIR, relación beneficio/costo, periodo de recuperación del capital. Son difíciles de aplicar ya que no todos los proyectos tienen la información financiera requerida).	Dominancia entre proyectos (se aplica en incertidumbre y determina dominancia en una característica a partir de resultados esperados. La determinación de probabilidades es difícil que logre altos grados de confianza) Programación lineal (a partir de una función objetivo de utilidad se maximiza sujeto a un conjunto de restricciones. Es muy difícil de aplicar ya que requiere evaluaciones exhaustivas para cada alternativa y el crecimiento del problema matemáticamente se torna más complejo al incorporar más elementos o datos)
Métodos Cualitativos	Lista de verificación (verifica en forma sencilla y rápida si cumple con los objetivos fijados. Sirve para descartar proyectos que no cumplen ciertas condiciones) Aporte a metas (mide el aporte de un proyecto al logro de metas. Prácticamente es muy difícil de aplicar por lo complejo de la determinación de estos) Q-sorting (jerarquiza proyectos a partir de grupos de evaluadores según sus aportes a los objetivos de la organización)	Delphi (estructura un proceso de comunicación grupal para resolver un problema complejo. Se aplica en la predicción de eventos bajo incertidumbre. El método ofrece certeza en el acuerdo. Es muy costoso y largo en tiempo).
Métodos Mixtos		Métodos de puntuación (es una extensión del método aporte a metas. Se agrega la determinación de ponderaciones para objetivos) AHP (metodología de análisis multicriterio. Descompone lo complejo en componentes, ordena estos en una estructura jerárquica, se obtienen valores numéricos para los juicios de preferencia y se sintetiza que variable tiene más alta prioridad)

Fuente: Elaboración propia

3.3 Métodos multicriterio

Los métodos multicriterio pueden ser clasificados según el flujo de información entre los actores principales: el tomador de decisiones y el analista (Moreno Jimenez, 1989).

El primer grupo de métodos multicriterio considera que el tomador de decisión no tiene información. Por lo tanto, el analista informa al decidor fluyendo la información en este sentido. Los siguientes métodos caen en esta categoría:

- Ponderaciones
- ε -restricción
- Simplex multicriterio

El segundo grupo de métodos multicriterio es el tomador de decisión quien tiene información. En otras palabras la información fluye desde el tomador de decisiones hacia el analista. A su vez en este segundo grupo se puede hacer una segunda clasificación. Esta se basa en la cantidad de alternativas. Estas pueden ser infinitas o finitas. Para el primer subgrupo las soluciones son encontradas mediante técnicas de optimización. Entre ellas podemos encontrar:

- Método por Programación por Compromiso
- Método Programación por Metas

Para aquel grupo de soluciones finitas se puede hablar de métodos por agregación y métodos basados en relaciones por orden. Los primeros pueden ser directos o por Jerarquía. Este último, el Jerárquico, contiene el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) que utiliza esta tesis.

Por último el tercer grupo considera un flujo de información entre el tomador de decisiones y el analista. Estos son conocidos como métodos interactivos entre los que se encuentran: STEM y Ziot-Wallenius.

En la siguiente tabla se puede ver un resumen de los métodos multicriterio.

Tabla 6: Resumen de Métodos Multicriterio

i) Sin información a priori	La información va desde el analista hasta el decidor
<p>Los siguientes métodos caen en esta clasificación:</p> <p>i.1) Ponderaciones i.2) ε-restricción i.3) Simplex multicriterio</p>	

ii) Con información a priori	La información va desde el decidor al analista
<p>Se sub clasifican según la cantidad de alternativas:</p> <p>ii.1) Infinito. Se aplican técnicas de optimización</p> <p> ii.1.1) Método por Programación por Compromiso</p> <p> ii.1.2) Método Programación por Metas</p> <p>ii.2) Finito</p> <p> ii.2.1) Métodos por agregación. Se modelizan las preferencias a través de la función valor</p> <p> ii.2.1.1) Directos</p> <p> ii.2.1.1.1) Técnicas de utilidad multiatributo (MAUT). Expresa las preferencias sobre un conjunto de criterios en términos de la utilidad que reportan</p> <p> ii.2.1.2) Jerarquía: Proceso Analítico Jerárquico (AHP)</p> <p> ii.2.2) Métodos basados en relaciones de orden. Las preferencias son mostradas a través de un sistema de relaciones binarias</p> <p> ii.2.2.1) Método de superación (MS)</p>	
iii) Flujo entre ambos sentidos	La información fluye en ambos sentidos
<p>Son conocidos como métodos interactivos. Ejemplos:</p> <p>iii.1) STEM</p> <p>iii.2) Ziot – Wallenius</p>	

Fuente: Elaboración propia

3.4 Proceso Analítico Jerárquico

Este método se base en los siguientes principios: construcción de jerarquías, establecimiento de prioridades y consistencia lógica.

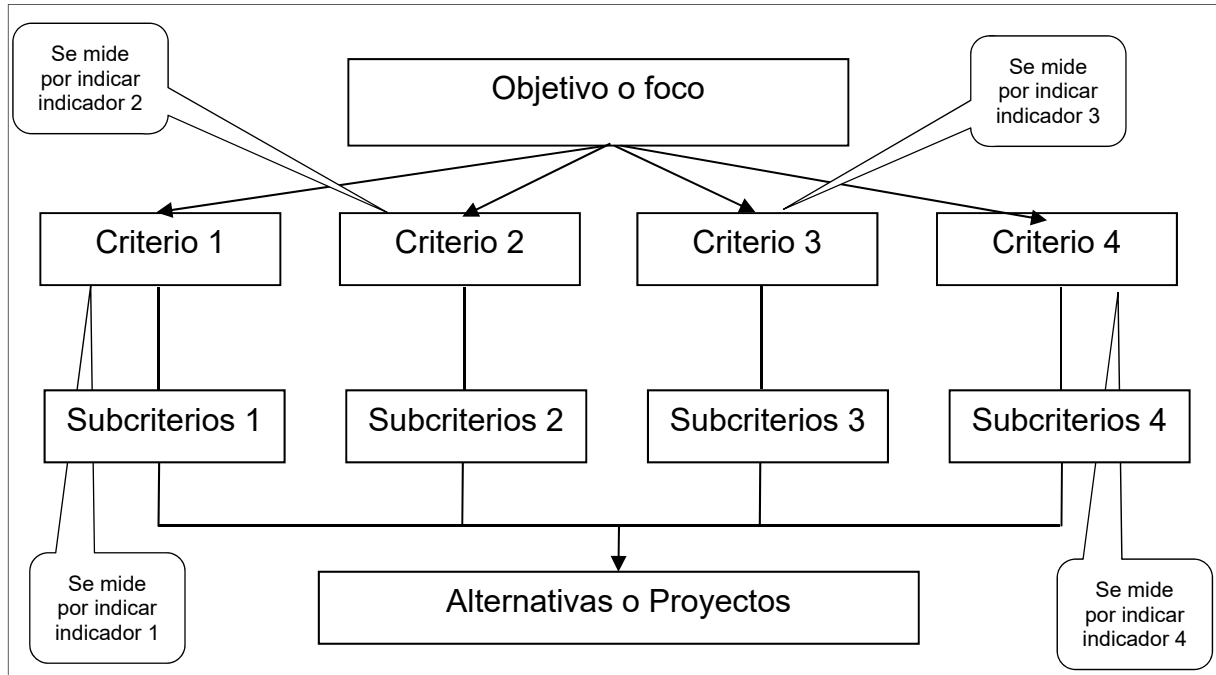
Las jerarquías se pueden descomponer en:

- Objetivo o foco: es un objetivo general y amplio.
- Criterios: son elementos para conocer los ámbitos involucrados para la consecución de objetivos de nivel estratégico.
- Sub criterios: son aquellos componentes de nivel más técnico que permiten conocer como contribuyen a los objetivos de acuerdo al componente.
- Alternativas: corresponde a aquellas opciones que serán evaluadas de acuerdo a los elementos de la jerarquía.

Un equipo de trabajo mediante un proceso interactivo realiza la confección de la jerarquía. Las necesidades de la organización están en primer lugar, la cual se manifiesta a través del establecimiento del objetivo del modelo alineado a las estrategias de la organización manteniendo de esta forma una flexibilidad de adaptación.

Los elementos de la jerarquía se pueden diagramar de la siguiente forma:

Figura 15: Jerarquía Simple de un Modelo AHP



Fuente: (PACHECO & CONTRERAS, 2008)

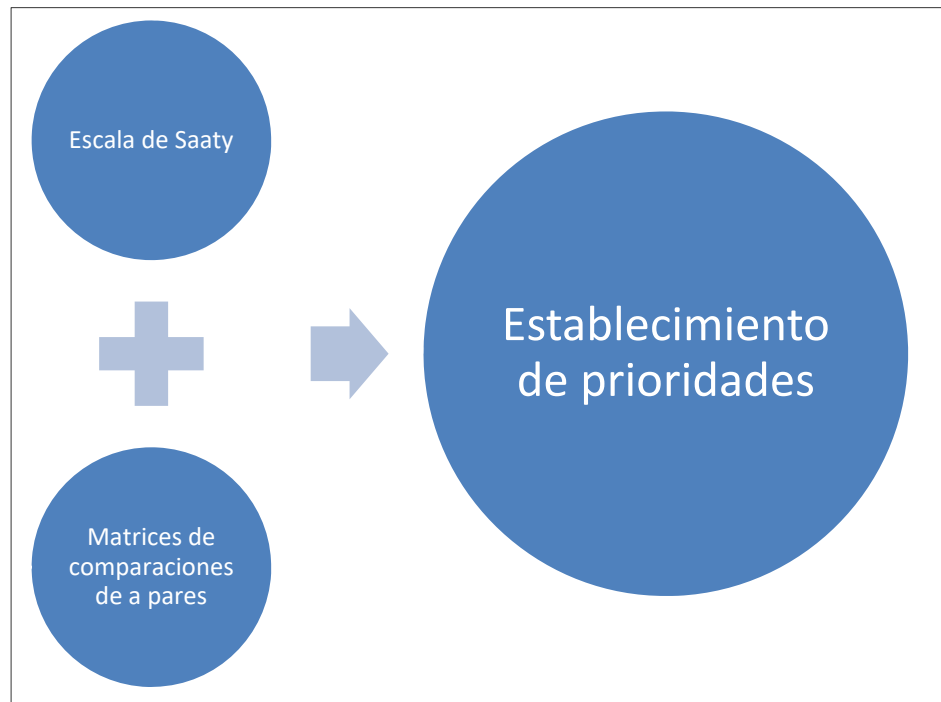
Profundizando los conceptos de los principios tenemos:

- Construcción de jerarquías: conducen el sistema a un objetivo deseado que puede solucionar conflictos obteniendo un desempeño eficiente. En base a la identificación de los criterios y el valor de los indicadores se podrá determinar cómo contribuye cada alternativa a la consecución del objetivo principal del proyecto.

Los niveles jerárquicos desde el objetivo, criterios de nivel estratégico y criterios técnicos deben alinearse para contribuir en el mismo sentido respetando el principio de interdependencia entre criterios. A nivel horizontal los criterios son independientes y a nivel vertical los criterios dependen entre ellos. En el caso de los indicadores pueden tener dependencia entre sí viéndolos desde una perspectiva horizontal.

- Establecimiento de prioridades: para el establecimiento de prioridades se utilizan matrices de comparaciones de a pares. Se hace uso de una escala única de prioridades para lograr la uniformidad de ellas que se podrían encontrar entre los diferentes criterios. Usando la percepción de expertos entre los diferentes elementos se determinan las preferencias entre ellos.

Figura 16: Establecimiento de prioridades de un Modelo AHP



Fuente: (Arancibia, Modelación Multicriterio, 2017)

A continuación se presenta la escala de SAATY que permite evaluar en forma de a pares la preferencia entre dos criterios.

Tabla 7: Escala para la comparación de pares de alternativas de Saaty.

Intensidad	Definición	Explicación
1	De igual importancia	Actividades contribuyen de igual forma al objetivo
3	Moderada importancia	La experiencia y el juicio favorecen levemente a una actividad sobre la otra
5	Importancia fuerte	La experiencia y el juicio favorecen a una actividad sobre la otra
7	Muy fuerte o demostrada	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente una actividad sobre la otra
9	Extrema	La evidencia que favorece una actividad sobre otra es absoluta y totalmente clara
2,4,6,8	Valores intermedios	Cuando se necesita un compromiso de las partes entre valores adyacentes
Recíprocos	$a_{ij}=1/a_{ji}$	Hipótesis del método

Fuente: (Saaty, 1997)

Se crea una matriz para cada criterio o subcriterio de la jerarquía que determina la prioridad P_{ij} de los elementos de su nivel inferior. Frente a más de un tomador de

decisiones lo ideal es el consenso entre ellos, sin embargo, si no lo hay, Saaty integra los juicios en base a la media geométrica:

$$A_{ij} = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n a^n_{ij}}$$

Donde:

A_{ij} : Resultado de la integración de los juicios para el par de criterios i, j .

a^n_{ij} : Juicio del involucrado n para el par de criterios i, j .

$n = 1, \dots, n$: Número de involucrados que expresan sus juicios sobre los criterios.

Una vez obtenida la matriz de comparación el problema se puede expresar mediante vectores y valores propios:

$$A * w = \lambda * w$$

A : Matriz recíproca de comparación de a pares (juicio de importancia/ preferencia de un criterio sobre otro).

w : Vector propio que representa el ranking u orden de prioridad.

λ : Máximo valor propio que representa una medida de la consistencia de los juicios.

- Consistencia lógica

Está en relación el grado de dispersión de los juicios del actor. Las relaciones entre objetos e ideas para efectos del modelo deben ser consistentes y congruentes. Esto se expresa a través de la transitividad y la proporcionalidad.

La transitividad se puede apreciar en los valores de tres preferencias: si la preferencia₁ es menor que la preferencia₂ y la preferencia₂ es menor que la preferencia₃, entonces, por transitividad la preferencia₁ es menor que la preferencia₃. Por otro lado está la proporcionalidad donde P_1 es 2 veces mayor que P_2 y P_2 es 3 veces mayor que P_3 , por lo tanto, P_1 es 6 veces mayor que P_3 . Si se considera la transitividad y la proporcionalidad tendremos un juicio consistente.

La Proporción de Consistencia es una forma de medir la consistencia global en un AHP. La Proporción de Consistencia es una relación entre el índice de consistencia y el índice aleatorio. El índice de consistencia mide la desviación de consistencia de la matriz de comparaciones a pares y el índice aleatorio es el índice de consistencia de una matriz recíproca aleatoria, con recíprocos forzados (escala de 1 a 9).

El valor de proporción de consistencia no debe ser mayor que 10%. Esto significa que el AHP ha sido realizado sobre un juicio informado.

Saaty ofrece una nueva relación con cálculos más sencillos:

$$\lambda_{Max} = V * B$$

Donde:

λ_{Max} : máximo valor propio de la matriz de comparación a pares.

V : es el vector de prioridades o vectores propios de la matriz de comparaciones.

B : es una matriz fila, que corresponde a la suma de los elementos de cada columna de la matriz de comparación a pares.

El índice de consistencia (CI) se calcula de la siguiente forma:

$$CI = \frac{\lambda_{Max} - n}{n - 1}$$

Donde

n : dimensión de la matriz de consistencia.

La relación de consistencia requiere de un índice aleatorio (RI). Saaty construyó una tabla con índices aleatorios para una serie de matrices aleatoria con recíprocos forzados la cual se presenta a continuación:

Tabla 8: Índice aleatorios por tamaño de matriz

Tamaño de la Matriz	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Índice Aleatorio	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Fuente: (Saaty, 1997)

La relación de consistencia (RC) se calcula de la siguiente forma

$$RC = \frac{CI}{RI}$$

En caso de que la relación de consistencia sea mayor que 0,1 no hay evidencia de un juicio informado. Entonces se deberán reevaluar los juicios expresados en la matriz de comparaciones. Esto significa consultar nuevamente a los expertos.

En (Saaty, 1997) junto con los principios se presentan cinco axiomas que rigen la aplicación de este método se realice de acuerdo al objetivo y parámetros que fija el autor:

Axioma 1: Condición de Juicios Recíprocos

Siendo A_i/A_j la intensidad de preferencia del criterio A_i sobre el criterio A_j la preferencia A_j/A_i debe ser la inversa.

Axioma 2: Condición de homogeneidad de los elementos

El mismo orden de magnitud debe aplicar a los elementos que se comparan

Axioma 3: Dependencia de los elementos

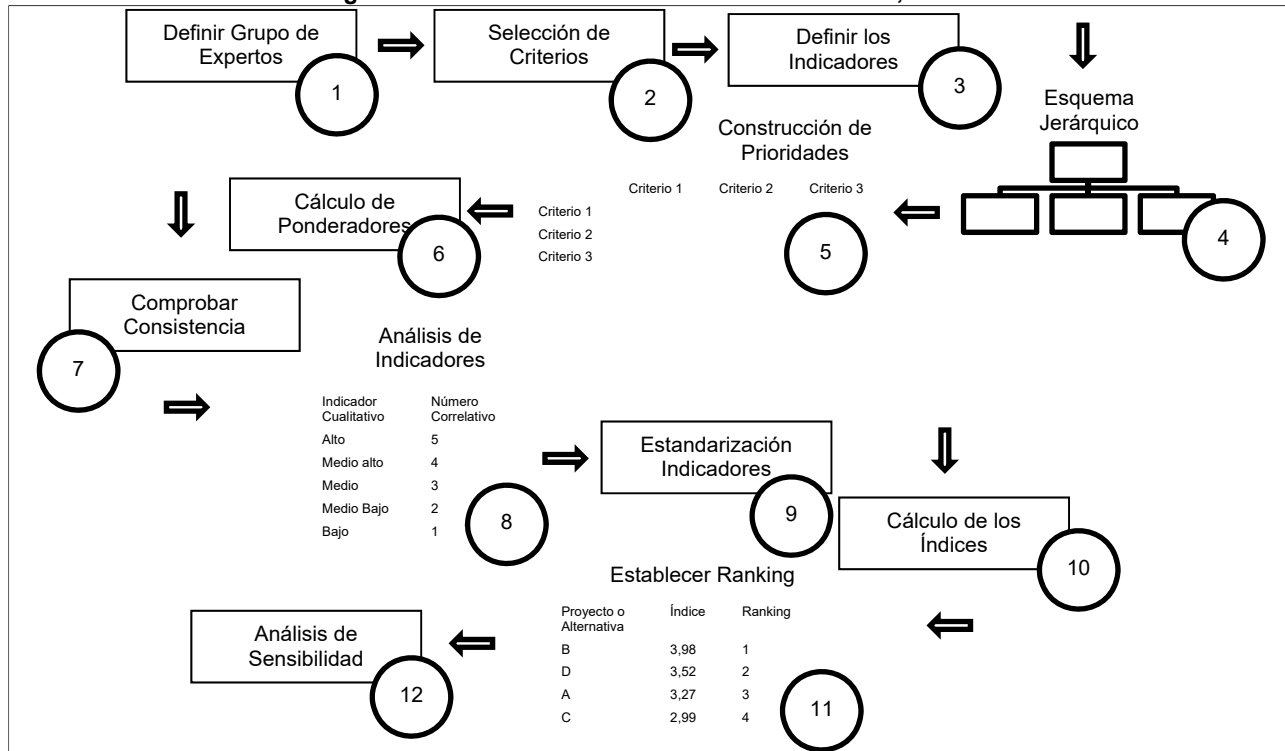
Existe dependencia de los elementos de dos niveles consecutivos e independencia en un mismo nivel.

Axioma 4: Expectativas de orden rango

La estructura basada en los criterios y alternativas debe estar en relación a las expectativas.

El procedimiento se puede expresar en el siguiente diagrama

Figura 17: Proceso de una evaluación Multicriterio, AHP



Fuente: (PACHECO & CONTRERAS, 2008)

Tabla 9: Pasos del proceso de una Evaluación Multicriterio

N°	Etapas	Descripción
1	Definir Grupo de Experto	El número de expertos va a depender de los recursos con que cuente el proyecto. Se debe formar un equipo de trabajo que debe incluir a lo menos parte de los expertos donde estos se destaquen por los conocimientos del área a intervenir. Las reuniones con expertos de considerar los mecanismos para llegar consenso.
2	Selección de Criterios	En esta etapa los criterios se deben identificar, definir, contar y verificar. La identificación se refiere a que deben utilizarse diferentes fuentes para descubrirlos. La definición debe incorporar el concepto de claridad de manera de desarrollar las variables que lo medirán. El conteo se refiere a que por motivos de cálculo estos no pueden ser más de 10. La verificación se refiere a revisar su alineación con los objetivos.
3	Definir los Indicadores	Como se medirán los criterios
4	Esquema Jerárquico	Se debe realizar este diagrama para tener una panorámica del proceso
5	Construcción de Prioridades	Se ingresan los juicios de los expertos en relación a los criterios y los elementos.
6	Cálculo de Ponderadores	A partir de los juicios de los expertos se calculan los ponderadores
7	Comprobar Consistencia	Se debe verificar si la relación de consistencia es menor al 10%
8	Análisis de Indicadores	Los indicadores deben estudiarse como se homologan a escalas que sean comparables
9	Estandarización Indicadores	Homologación a escalas comparables
10	Cálculo de los Índices	Se calculan los indicadores en base a las formulas definidas
11	Establecer Ranking	Se realiza un ordenamiento jerárquico de las opciones
12	Análisis de Sensibilidad	Qué pasa si se cambia la importancia relativa de las ponderaciones de los indicadores.

Fuente: (PACHECO & CONTRERAS, 2008)

3.5. Aplicación del Método

3.5.1. Definición del Grupo de Expertos

La evaluación de las alternativas de continuidad operacional de la plataforma nuclear de la CChEN requiere de la participación de un equipo multidisciplinario. Se han considerado las siguientes disciplinas con sus respectivos representantes para contribuir con la aplicación del método.

- Sector Desarrollo Social

Es muy importante la perspectiva de la ciudadanía y como se puede ver beneficiada esta con las inversiones en activos nucleares y radiológicos que permitan obtener una mejora social. El foco de la ciudadanía como centro de las políticas de gobierno es un factor de mucha relevancia que no puede estar ausente.

- Sector Presupuesto Nacional

Cada actividad dentro de la nación debe estar sujeta a la realización de un balance estructural, incluso la provisión de los derechos constitucionales. Es por ello que esta evaluación tampoco es la excepción. Se espera obtener de este experto de este sector una visión transversal de la gestión presupuestaria a nivel país.

- Sector de Seguridad Nuclear

Los niveles de seguridad nuclear y radiológica para las instalaciones de este tipo son un requisito establecido por ley. Es por ello que los criterios a la hora de elegir una alternativa deben estar instalados desde un inicio de manera tal que se reflejen directamente en su evaluación inicial.

- Sector de Tecnología Nuclear

La eficiencia y eficacia de los procesos nucleares y radiológicos debe estar presentes. El manejo de la eficiencia del ciclo de combustibles, gestión de desechos, el emplazamiento, ciclos térmicos, físicos y químicos deben estar presentes.

- Sector Estratégico Nuclear

Existen criterios en el sector nuclear a nivel ministerial e institucional que es necesario considerar. Entre ellos se encuentra la seguridad física, núcleo electricidad y producción & servicios, los cuales son sólo algunos temas que están presentes a nivel de autoridades que deben reflejarse en la evaluación.

- Sector de Investigación Nuclear

Para realizar investigación en el sector nuclear de nivel avanzado se requieren fuertes niveles de inversión en tecnología y laboratorios de punta que permitan a los investigadores realizar su trabajo. Por ejemplo, un reactor nuclear con flujo neutrónico alto es sólo uno de los criterios. Otro ejemplo, es un ciclotrón que permita la proyección de un haz para realizar investigación también podría ser considerado.

Entendido los sectores se plantean los siguientes expertos por sector

Tabla 10: Roles y Expertos que participan en el Modelo AHP

Sector	Experto
Desarrollo Social	Sra. Viviana Espinoza
Presupuesto Nacional	Sra. Viviana Espinoza
Seguridad Nuclear	Sr. Cristian Sepúlveda
Tecnología Nuclear	Sr. Eugenio Vargas
Estratégico Nuclear	Sr. Eugenio Vargas
Investigación Nuclear	Sr. Eugenio Vargas

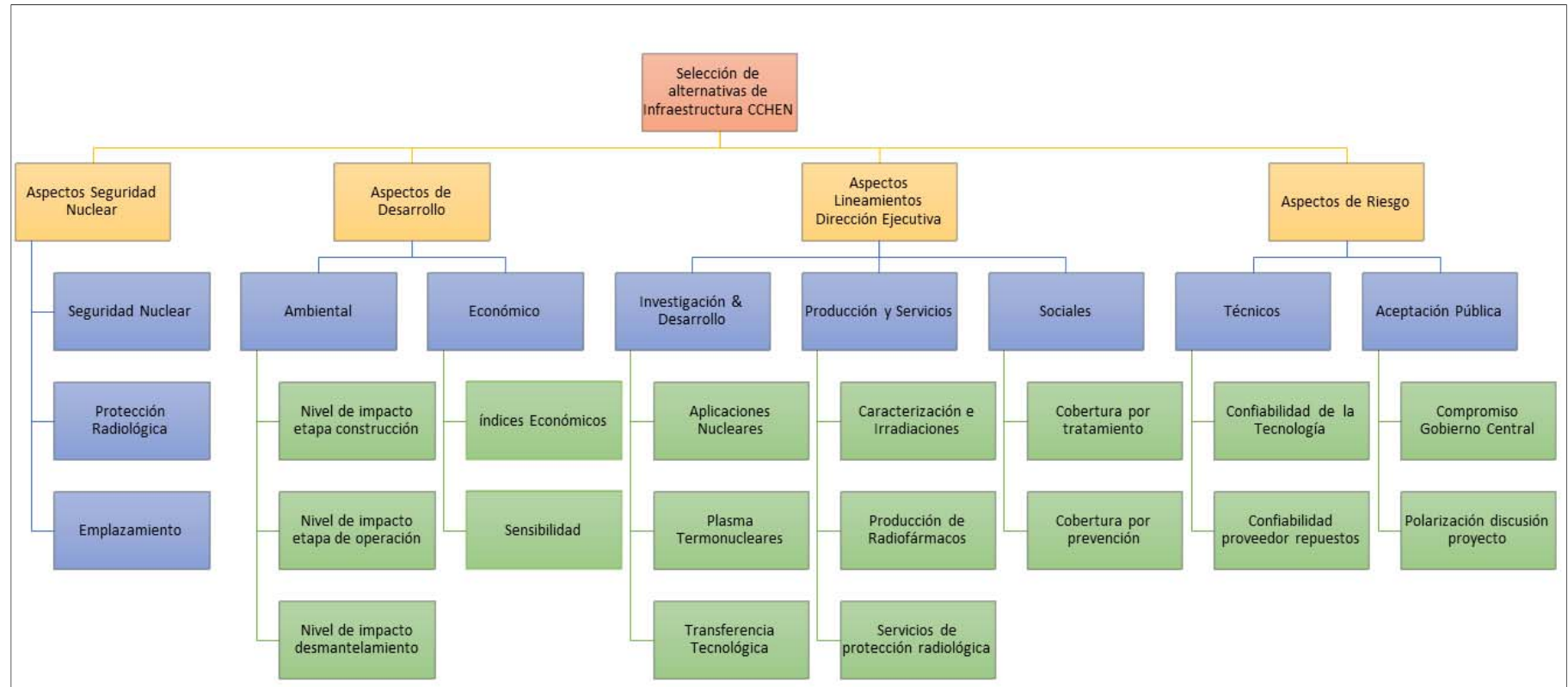
Fuente: Elaboración propia

3.5.2. Esquema Jerárquico

De acuerdo a reuniones sostenidas con los diferentes expertos y los profesores Eduardo Contreras y Sara Arancibia se ha desarrollado el árbol jerárquico del modelo que se presenta en la imagen que se muestra en la siguiente hoja.

El árbol jerárquico está constituido por el objetivo “Selección de alternativas de infraestructura CChEN”, de color naranja. Alineados a este objetivo se encuentran los objetivos estratégicos como Aspectos de Seguridad Nuclear, de Desarrollo, Lineamientos de Dirección Ejecutiva (DE) y Riesgo de color amarillo. A continuación, apoyando cada uno de estos criterios, se encuentran los criterios de nivel técnico de primer nivel en color azul. Dependiendo de estos últimos están los criterios de nivel técnico de segundo nivel de color verde.

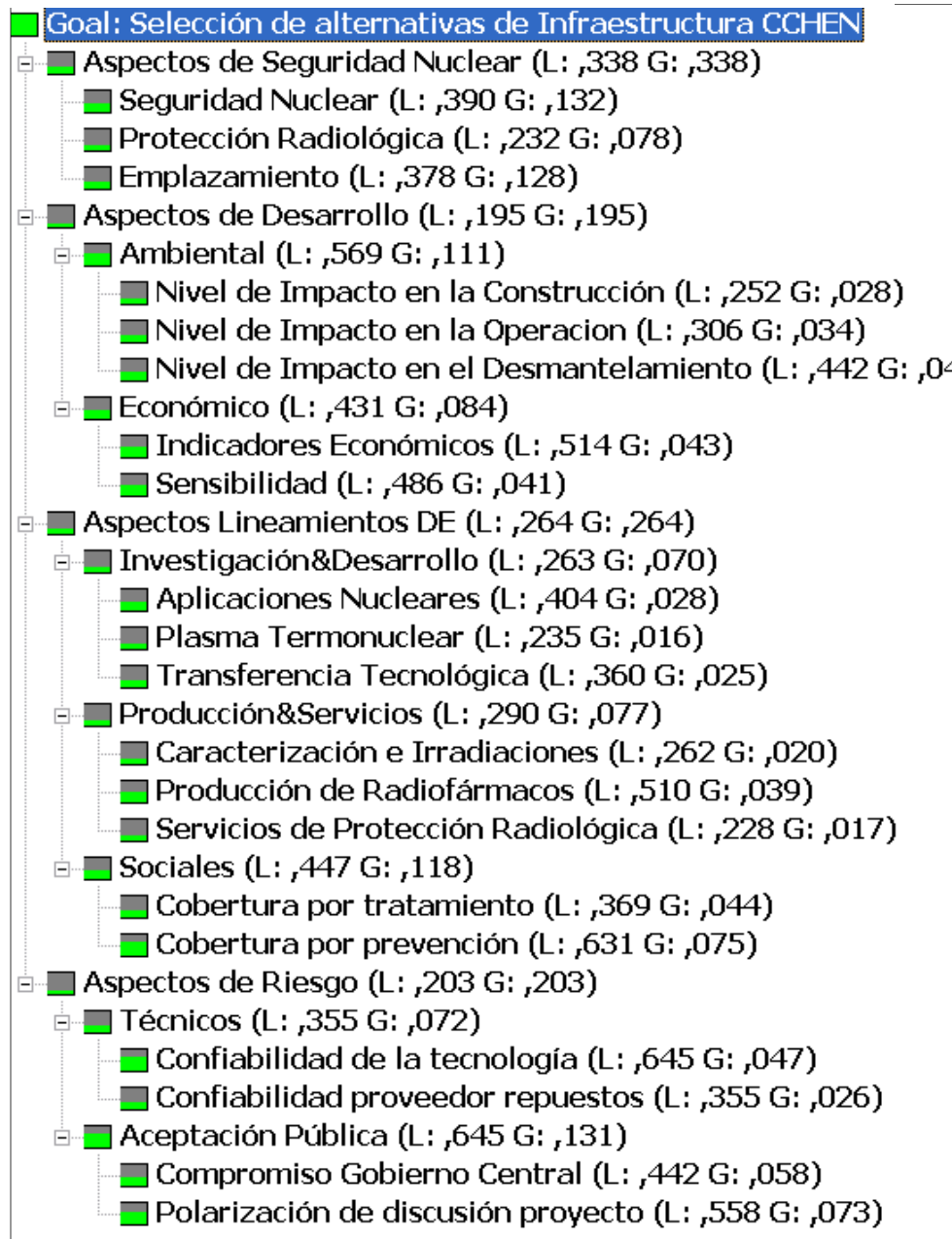
Figura 18: Árbol Jerárquico de Criterios del Modelo Desarrollado



Fuente: Elaboración propia

Dado que los expertos para la evaluación de juicios de peso de a pares de los criterios no pudieron reunirse se realizaron entrevistas individuales. La herramienta que se utiliza para capturar la opinión experta fue el programa Expert Choice. Se utiliza esta herramienta computacional para calcular la media geométrica llegando al peso de cada criterio respecto de su par el cual se muestra a continuación.

Figura 19: Árbol Jerárquico de Criterios – Comparación de Pares – Pesos Locales y Globales



Fuente: Elaboración propia

En la figura se puede apreciar que el criterio estratégico más importante pesado por los expertos, es el aspecto de seguridad nuclear y el menos es importante son los lineamientos de DE¹⁷. Por otro lado, el criterio técnico más importante para los expertos es el emplazamiento y los menos importantes son Plasma Termonuclear y Transferencia Tecnológica.

3.5.3. Selección de Criterios

A continuación, se presenta el diccionario de criterios. Este permite consensuar el entendimiento de cada definición de criterios de manera de facilitar la evaluación de pares de los expertos.

Definir el foco del problema: este corresponde a la selección de las alternativas de continuidad operacional de la plataforma nuclear de la Comisión Chilena Nuclear que permita responder a las diferentes necesidades de nivel país. Las alternativas de continuidad operacional se expresan en un número reducido de alternativas que incluye tecnología de reactores nucleares de investigación con aplicaciones de producción y por otro lado tecnología de ciclotrones. Entre las necesidades de nivel país se encuentran una variedad de dimensiones como lo son elementos sociales, económicos, producción de conocimiento y otros aspectos estratégicos.

Identificación de los criterios de selección: se han mantenido reuniones con expertos principalmente del área de seguridad nuclear, tecnología nuclear y sector socioeconómico donde se han acordado los criterios de selección. Las reuniones con los expertos se ha llevado cabo en forma individual explicando la metodología para luego pasar a la identificación de criterios. Para validar del árbol jerárquico se ha recurrido a la revisión por parte de expertos académicos de la Universidad de Chile en AHP.

Aspectos de Seguridad Nuclear: Este criterio estratégico considera elementos relacionados con la seguridad de la tecnología nuclear en diferentes fases. En primera instancia, el emplazamiento, aborda la seguridad desde el punto de vista de la selección de un sitio apropiado que minimiza los factores que podrían causar un accidente nuclear relacionado. En segundo lugar, la seguridad es abordada en base a condiciones de diseño de infraestructura y sistemas redundantes por capas. En último lugar, la protección radiológica, está constituida por elementos de seguridad que buscan minimizar la exposición a radiaciones ionizantes de las personas en la operación.

- **Seguridad Nuclear:** Este criterio técnico busca identificar cuan segura es una tecnología nuclear a partir de sus sistemas de seguridad en conjunto para evitar un accidente nuclear. Los sistemas se modelan a través de diferentes técnicas permitiendo realizar la comparación entre diferentes alternativas.

¹⁷ DE: Lineamiento de Dirección Ejecutiva

- **Protección Radiológica:** Este criterio técnico busca identificar como la tecnología nuclear en análisis permite minimizar la exposición a las radiaciones ionizantes de los trabajadores. Esto tiene que ver con la seguridad operacional de las personas.
- **Emplazamiento:** Este criterio tiene que ver con la localización geográfica del proyecto donde se consideran elementos como accesibilidad, acceso a servicios básicos, alejamiento de fallas geológicas, alejamiento de zonas con movimientos sísmicos históricos, alejamiento de zonas con deslizamientos históricos de tierra, alejamiento de zonas de maremotos y otros similares.

Aspectos de Desarrollo: Este criterio de nivel estratégico busca considerar aspectos relacionados con un desarrollo económico sostenible y que sea amigable con el medio ambiente durante todo el ciclo de vida del proyecto tecnológico nuclear.

- **Ambiental:** Este criterio de nivel operativo intermedio busca que los proyectos no generen impactos de actividad humana sobre el medio ambiente considerando la legislación legal vigente tanto a nivel nacional como internacional. Los impactos ambientales deben considerar todas las etapas: de construcción, de operación y de desmantelamiento. Se utiliza un procedimiento donde se identifican y evalúan los impactos sobre el medio físico y social denominado evaluación de impacto ambiental (EIA). Se utiliza un documento oficial emitido por la institución respectiva al final del proceso conocido como Declaración de Impacto Ambiental (DIA). La EIA contiene acciones de mitigación que se aplican mediante una jerarquía de mitigación.
 - **Impacto en la construcción:** Este criterio técnico, para el proyecto en evaluación, considera para la etapa de construcción las partes, obras, actividades, insumos, emisiones, residuos y contingencias que afectan el entorno para la evaluación del impacto ambiental. Se entiende el entorno como el medio ambiente, las personas y localidades cercanas. La evaluación de impacto ambiental siempre considera el escenario más desfavorable en su análisis. El impacto medio ambiental puede reducirse con medidas de gestión ambiental, mitigación, prevención, reparación o compensación y control de emergencias. Para los proyectos de infraestructura nuclear no hay impacto especial en la construcción. Puede considerarse como un gran proyecto convencional.
 - **Impacto en la operación:** Este criterio técnico se refiere a cómo el proyecto afecta al entorno medio ambiental, a las personas y localidades cercanas en la etapa operación. Ha de tenerse en cuenta que el principal impacto ambiental de un reactor nuclear de investigación está relacionado con el ciclo de combustible y los efectos de los eventos nucleares. Los riesgos de operación relacionados con las emisiones de efecto de gases invernadero son menores. Para los reactores nucleares de investigación existen sistemas de seguridad exhaustivos bajando la probabilidad a

valores cercanos a 10^{-4} de que se produzca un evento que genere un impacto negativo como podría ser la liberación de cantidades importantes de productos de fisión al medio ambiente. En el caso de un ciclotrón el impacto medio ambiental en esta etapa es menor que un reactor nuclear de investigación.

- **Impacto en el desmantelamiento:** Este criterio técnico se refiere a cómo afecta al entorno medio ambiental, a las personas y localidades cercanas de la alternativa a evaluar en la etapa de desmantelamiento de un proyecto de infraestructura nuclear. Al detener en forma definitiva un reactor nuclear de investigación se debe proceder al retiro de los elementos combustibles gastados del núcleo y de la piscina para su gestión de reciclaje en aquellos países miembros del IAEA que tengan esta capacidad. Se debe proceder a tratar como desechos nucleares los elementos del circuito primario que incluye líquidos, intercambiadores de calor, bombas y cañerías. La gestión de desechos nucleares implica un tratamiento de confinación mediante concreto en tambores, para reducir las emisiones radiactivas y luego su almacenaje en forma temporal o definitiva en repositorios, los cuales son instalaciones compartidas con elementos de infraestructura para su monitoreo y seguridad evitando así que dañen el medio ambiente. Comparado un reactor nuclear de investigación con un ciclotrón en el desmantelamiento, el impacto ambiental de este último es considerablemente menor. Luego el resto de las instalaciones se disponen en forma convencional.
- **Económico:** Este criterio técnico de nivel intermedio considera los aspectos socio-económicos de la alternativa a través de una evaluación económica desde el punto de vista de los retornos a la inversión. Por otro lado, también se considera cómo la alternativa que puede verse afectada producto de la sensibilidad a cambios en las condiciones del proyecto que afecten los beneficios sociales esperados.
 - **Índices Económicos:** Este criterio técnico de segundo nivel busca considerar aspectos relacionados al retorno a la inversión utilizando indicadores económicos como el VAN Social y IVAN (fracción entre VAN e Inversión). El VAN social incorpora el uso de precios sociales los cuales utilizan el valor verdadero de los recursos para la sociedad. Para efectos de la evaluación social, se consideran los valores sociales entregados por el Ministerio de Desarrollo Social en relación a valores de la mano de obra, divisa, tasa social de descuento y valor social de los costos de operación.
 - **Sensibilidad:** Busca captar el impacto en la sensibilidad de cambios sobre los beneficios sociales a partir de cambios en las variables del proyecto. En otras palabras, esto significa que a pesar de la planificación que pueda realizarse sobre un proyecto, hay situaciones que afectarán

más a un proyecto que otro. Los proyectos más afectados serán más sensibles y los menos afectados menos sensibles.

Aspectos de lineamientos de la Dirección Ejecutiva: Este criterio de nivel estratégico busca considerar a aquellas alternativas de proyectos que se alineen con las directrices institucionales lideradas por la Dirección Ejecutiva. Entre los elementos principales que la Dirección ha impulsado, se encuentra la investigación y desarrollo, producción y servicios y aspectos sociales. Los énfasis establecidos por Dirección Ejecutiva se encuentran enmarcados por el mandato establecido por ley para esta institución. Actualmente la CChEN se encuentra en procesos de fortalecimiento de cada uno de los elementos mencionados de acuerdo a las necesidades priorizadas por el supremo gobierno.

- **Investigación y Desarrollo:** Este criterio operativo de primer nivel considera el impacto de la investigación y desarrollo en las líneas establecidas por la institución. Se busca considerar cómo cada una de las alternativas de continuidad operacional contribuyen con este criterio. La investigación y desarrollo en el sector nuclear considera una variedad muy amplia de temas de investigación que actualmente está siendo potenciada e integrada a través de la nueva Institucionalidad representada por unidad la División de Investigación y Aplicaciones Nucleares.
 - **Aplicaciones Nucleares:** Este criterio de nivel técnico de segundo nivel busca considerar el impacto en la sociedad de la investigación en aplicaciones nucleares que no sean del área de conocimiento de plasma termo nuclear. Esta es una de áreas de mayor potencial en la CChEN. Las aplicaciones nucleares que pueden desarrollarse difieren dependiendo del proyecto alternativa que se está evaluando.
 - **Plasma Termonuclear:** Este criterio de nivel técnico considera el impacto en la sociedad de la investigación en aplicaciones nucleares que sean del área del conocimiento de plasma termo nuclear. Esta es unas de las áreas más desarrolladas. La investigación de plasma en la CChEN se realiza a través de una máquina denominada SPEED y otras similares no utilizando Reactores Nucleares de Investigación ni Ciclotrones.
 - **Transferencia Tecnológica:** Este criterio de nivel técnico de segundo nivel tiene presente el impacto de la tecnología nuclear en la sociedad incorporada como potenciales procesos productivos presentando los desafíos más importantes para la Institución. La transferencia tecnológica de la CChEN se ha logrado principalmente a través del emprendimiento desarrollado por los propios funcionarios de la institución que la han dejado.

- **Producción y servicios:** Este criterio técnico de primer nivel contempla el impacto de la alternativa del proyecto en la producción y servicios de nivel institucional de la venta directa a los clientes. La CChEN dentro de sus facultades instituciones otorgadas por ley tiene la función de producción y venta de productos relacionados a la tecnología nuclear. Basado en el principio de subsidiariedad del estado y la mantención de capacidades tecnológicas de nivel estratégico del país la CChEN ha mantenido la participación de la producción a nivel nacional a pesar de que el mercado existen empresas que venden productos y servicios similares. Estos mercados han sido catalogados como imperfectos justificando la participación del estado.
 - **Caracterización e Irradiaciones:** Este criterio de nivel técnico de segundo nivel contempla el aporte de la alternativa del proyecto a la línea de producto de caracterización e irradiaciones. El tipo de caracterización realizada es de tipo física donde se incluye las técnicas de Distribución y Tamaño de Partículas; Análisis Térmico; Porosimetría de Mercurio y Picometría de Helio. Por otro lado, los servicios de irradiación hacen uso de dos irradiadores experimentales uno de Co^{60} y otro de Cs^{137} . Estos equipos permiten la irradiación de alimentos, sangre, material quirúrgico con fines médicos y disminución de carga bacteriana.
 - **Producción de Radiofármacos:** Este criterio de nivel técnico de segundo nivel considera aspectos relacionados con la producción de radioisótopos y radiofármacos. Estos productos benefician principalmente a miles de chilenos que requieren de la medicina nuclear para el diagnóstico o terapia. Complementando esto más de cien mil pacientes utilizan diagnósticos más certeros y no invasivos con este tipo de técnicas. Este tipo de producto es generado por reactores nucleares de investigación para la medicina nuclear tradicional y para productos más avanzados se utilizan ciclotrones. En el mercado de radioisótopos y radiofármacos existen empresas que importan productos desde argentina los cuales son procesados agregándose valor adicional para luego comercializarlos.
 - **Servicios de protección radiológica:** Este criterio de nivel técnico de segundo nivel contempla como la alternativa de proyecto potencia esta línea de productos. Los elementos considerados en esta área corresponden a servicios de dosimetría personal, radiomedicina, metrología de radiaciones ionizantes, certificación radiológica, protección radiológica operacional y cursos de protección radiológica.
- **Sociales:** Este criterio de nivel técnico de primer nivel busca identificar la contribución de la alternativa del proyecto a los aspectos sociales. Se han considerado los aspectos relevados por la experta del Ministerio de Desarrollo Social que corresponden a cobertura por tratamiento y cobertura por prevención. La medicina nuclear tradicional tiene un mayor alcance a lo largo del país dado que los centros nucleares de medicina del mismo tipo se encuentran distribuidos

por todo el territorio nacional haciendo uso principalmente de radioisótopos de reactor y no de ciclotrón.

- **Cobertura por tratamiento:** Este criterio de nivel técnico de segundo nivel buscar captar el impacto de la alternativa del proyecto en el aspecto del tratamiento médico nuclear a lo largo del país. Las principales aplicaciones tradicionales (radioisótopos de reactor) terapéuticas son radioterapia interna, radioinmunoterapia, radiotrazadores análogos de hormonas, terapia paliativa del dolor, Sinovectomia Radioisotópica, tratamiento de hepatocarcinoma y otras (Chain & Illanes, 2015).
- **Cobertura por prevención:** Este criterio de nivel técnico de segundo nivel buscar captar el impacto de la alternativa del proyecto en el aspecto del tratamiento médico nuclear por prevención a lo largo del país. Las principales aplicaciones nucleares de la radiofarmacia tradicional para el diagnóstico son evaluación de tiroides, estudio óseo, función pulmonar, estudio renal, estudios cardiovasculares, linfocentellografía, procesos inflamatorios infecciosos y otras aplicaciones (Chain & Illanes, 2015). Por otro lado, el mismo autor señala que existe una tecnología más moderna denominada PET que utiliza radioisótopos de Ciclotrón. Este último tipo de técnica moderno de diagnóstico no tiene comparación dado la exactitud de sus resultados pero a un alto costo que la hace menos accesible.
- **Aspectos de Riesgo:** Este criterio de nivel estratégico busca identificar los riesgos de las alternativas de continuidad operacional para la institución desde dos dimensiones. Para los proyectos de tecnología nuclear de esta envergadura se pueden agrupar los riesgos en aquellos asociados a la tecnología y aquellos asociados a la aceptación pública. Estos elementos que afectan a un proyecto son relevados por el grupo de expertos como aquellas variables que si cambian podrían afectar la realización del proyecto. Si una de estas variables es riesgosa y afecta el beneficio del proyecto, entonces el proyecto es riesgoso.
- **Técnicos:** Este criterio de nivel técnico de primer orden busca captar el impacto de cada una de las alternativas del proyecto en las dimensiones de la tecnología y repuestos relacionadas con el riesgo asociado a la iniciativa. La confianza en la tecnología nuclear se basa en el uso. Hay 243 reactores nucleares de investigación en operación en el mundo al 2016 y la mayoría de estos tiene 40 años de operación. Lo anterior es una evidencia que la evolución de tecnología innovadora ha sido menor. Los tipos de reactores de investigación que predominan y se encuentran disponibles son tipo piscina, tipo tanque y tipo tanque en la piscina (IAEA5, 2016).
- **Confiabilidad de la tecnología:** Este criterio de nivel técnico de segundo nivel buscar captar la confiabilidad en la tecnología en el mercado internacional. Los proveedores a nivel mundial de tecnología nuclear de

reactores de investigación en construcción son la Comisión Nacional de Energía Atómica de Argentina (CAREM 25 PWR, LPRR Piscina para Arabia Saudita); AREVA - Francia (RES - Reactor de Propulsión PWR); Electricité de France (EDF), Vattenfall and Areva (REACTOR JULES HOROWITZ de tipo tanque en piscina); South Korea (Jordan Research and Training Reactor – Tanque en una piscina); Federación Rusa (PIK – Tanque, IPV-2M piscina, MBIR Reactor de investigación de sodio rápido multipropósito); Ukraine (KIPT Experimental Neutron Source SUBCRIT).

- **Confiabilidad de repuestos:** Este criterio de nivel intermedio busca identificar la confianza en relación a la provisión de repuestos para el activo de la alternativa de continuidad operacional. Asimismo busca identificar cuan confiable es el proveedor de acuerdo a conductas anteriores en relación a cumplimiento de acuerdos.
- **Aceptación Pública:** Este criterio de nivel técnico de primer nivel busca medir el impacto de cada una de las alternativas del proyecto en las dimensiones relacionadas con el riesgo en relación a la aceptación pública. Esta disciplina en el ámbito de la tecnología nuclear tiene que ver cómo se produce la relación con la ciudadanía. Las prácticas internacionales establecen recomendaciones relacionadas con transparencia, información pública y libre acceso a las instalaciones respetando las medidas de seguridad y consulta pública.
- **Compromiso del Gobierno Central:** Este criterio de nivel técnico de segundo nivel busca considerar el impacto del apoyo del gobierno central con respecto de la alternativa. Es necesario medir este nivel de apoyo dado la gran inversión de recursos para este tipo de infraestructura. Si se revisa los medios es posible darse cuenta de que con proyectos de este tipo sin un apoyo mínimo de la autoridad las barreras político administrativas no podrán ser salvadas.
- **Polarización del proyecto:** Este criterio de nivel técnico de segundo nivel busca identificar la polarización de la ciudadanía que podría alcanzar esta alternativa. Esta polarización depende de la cantidad de la población que esté a favor o en contra del proyecto. También tiene que ver con el nivel de conocimiento del tema que maneje la ciudadanía.

3.5.4. Definición de Indicadores

Las escalas de los indicadores se establecen en una escala común para todos, con el objetivo de que los juicios del evaluador sean consistentes para la evaluación de cada uno de ellos. La escala continua va desde el 0 al 1, donde para cada criterio se define los valores: 0 (mínimo), 0.5 (medio) y 1 (máximo). Se permite la asignación de valores intermedios continuos.

3.5.4.1 Indicadores para el criterio estratégico Aspectos de Seguridad Nuclear

3.5.4.1.1 Indicadores para el criterio técnico de primer nivel de Seguridad Nuclear

Indicador de Seguridad Nuclear Reactores de Investigación

Este mide el nivel de seguridad nuclear de cada una de las alternativas de continuidad operacional de la plataforma nuclear de la CCHEN¹⁸. Estas alternativas consideran la participación de un reactor nuclear de investigación en tres alternativas y un ciclotrón en la otra. Por lo tanto, deberán considerarse y homogenizarse esta variación entre las alternativas.

Para el IAEA la seguridad de las instalaciones nucleares se abordada desde varios puntos de vista como lo es la cultura de la seguridad, escala de eventos nucleares y radiológicos (INES¹⁹), estándares de seguridad como el NS-R-4 “Requirements on the Safety of Research Reactor”, principios generales y específicos de seguridad.

Figura 20: Escala Internacional de Eventos Radiológicos INES



Fuente: (IAEA4, 2016)

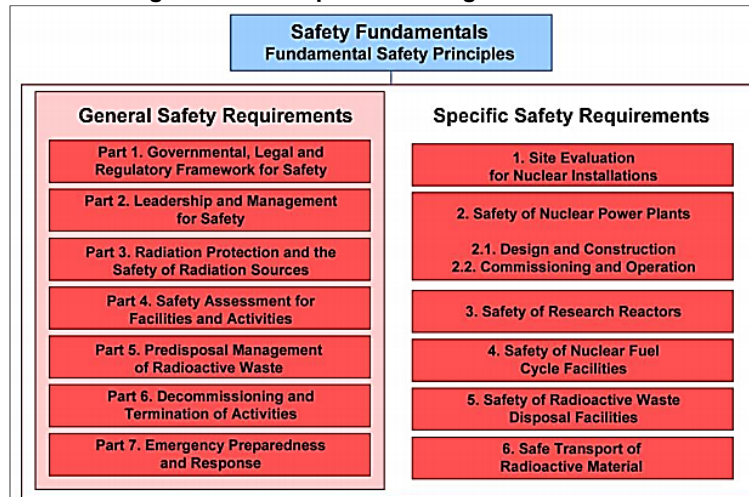
Los principios generales de seguridad consideran: aspectos regulatorios, liderazgo y gerencia de la seguridad, protección radiológica y la seguridad de las

¹⁸CCHEN: Comisión Chilena de Energía Nuclear (www.cchen.cl)

¹⁹INES: International Nuclear and Radiological Event Scale.

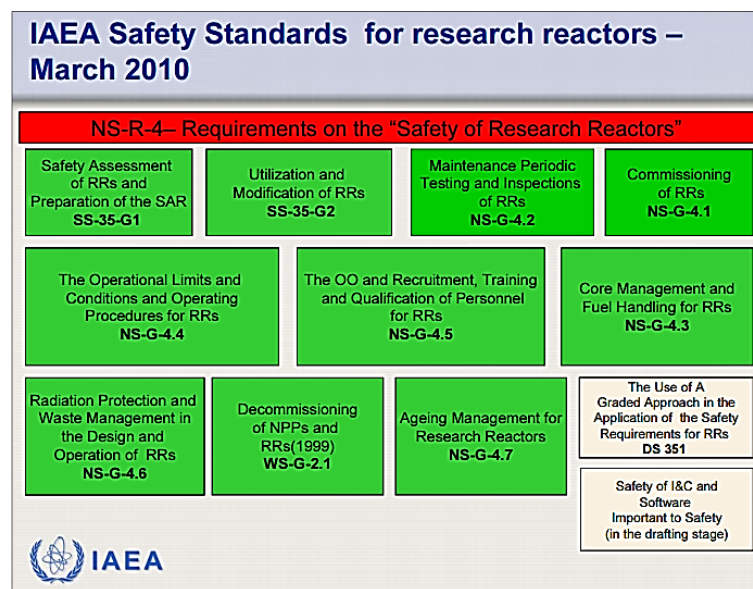
fuentes radiológicas, predisposición de la gestión de los desechos, decomisionamientos y término de las actividades, y por último preparación para la emergencia y respuesta. Los principios específicos consideran evaluación del sitio, diseño y construcción, comisionamiento y operación, seguridad en la investigación, seguridad del ciclo de combustibles, seguridad de las instalaciones de la gestión de desechos y seguridad en el transporte de material radiactivo.

Figura 21: Principios de la Seguridad Nuclear



Fuente: (Hassan Abou Yehia, 2010)

Figura 22: Colección de normas de seguridad del Organismo Internacional de Energía Atómica



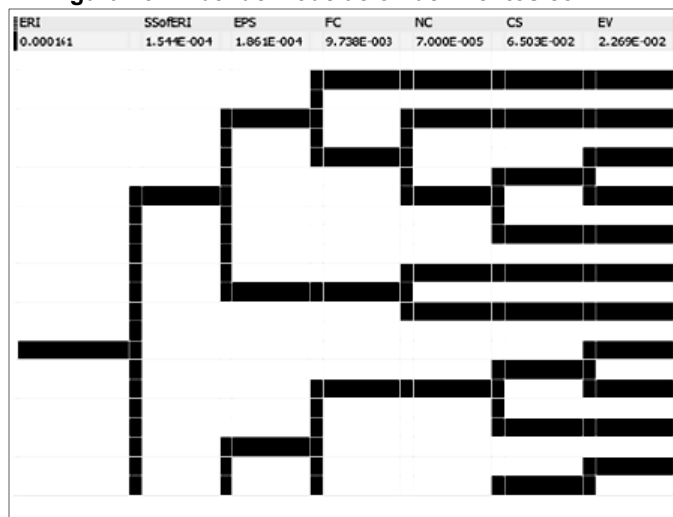
Fuente: (Hassan Abou Yehia, 2010)

El experto en Seguridad Nuclear define el uso del indicador “Core Damage Frequency” (CDF) para medir la seguridad nuclear en reactores de investigación. Esta

medida corresponde a la probabilidad de riesgo residual de un accidente nuclear que aún está presente a pesar de todas medidas preventivas y de mitigación que son consideradas en el diseño de un reactor nuclear de investigación. Esta es una herramienta de medición de seguridad probabilista que evalúa la seguridad en reactores nucleares. La aplicación de este tipo de herramienta es RAT (Risk Assessment Tool) que utiliza un árbol de eventos y otro de fallas para evaluar el daño final de CDF a través de un estudio de frecuencias de eventos.

El valor del CDF se encuentra en el orden de magnitud de 10^{-4} para los estándares del IAEA para reactores de investigación. Por ejemplo, el valor de este cálculo para el reactor TRIGA Research Reactor da un orden de magnitud de 10^{-6} (Kamyab, 2010). Se hace uso de la técnica CCF (common cause failures) para su cálculo debido a que los eventos están enlazados.

Figura 23: Árbol de Modelación de Eventos con RAT



Fuente: (Kamyab, 2010).

A continuación se muestra la tabla de umbrales para el Indicador de Seguridad Nuclear, donde se aprecia la fórmula de cálculo como una referencia a CCF. La columna de valores de umbrales del indicador muestra los límites señalados por el experto nuclear para su conversión a valores normalizados. Luego se aprecia la valorización ajustada para evitar el efecto escalera en los valores del indicador y por último se describe significado de cada fila.

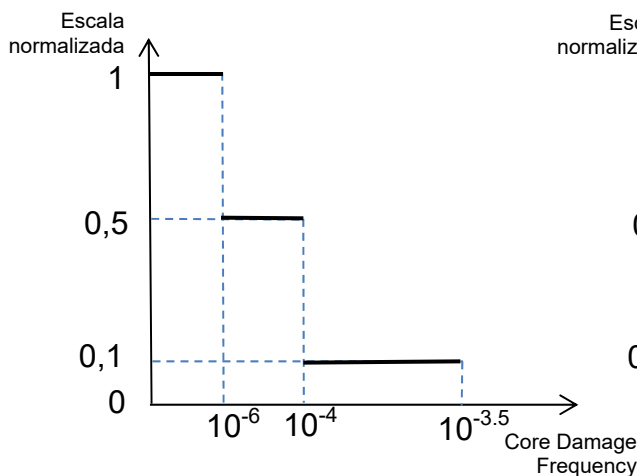
Tabla 11: Umbrales de Indicador Seguridad Nuclear

Nombre y Fórmula	Umbrales	Valorización normalizada experto	Valorización normalizada ajustada experto	Significado
Nivel de Seguridad	$10^{-6} \geq x$	1	1	Nivel alto de seguridad nuclear
Árbol de Modelación de Eventos con uso de CCF (Common cause failures)	$10^{-4} > x > 10^{-6}$	0,5	$f(x) = -5050,51 * X + 1,00505$	Nivel medio de seguridad nuclear
	$10^{-4} \leq x \leq 10^{-3,5}$	0,1	$f(x) = -1849,9 * X + 0,68499$	Nivel bajo de seguridad nuclear
	$10^{-3,5} < x$	N/A	N/A	Filtro, las alternativas que presenten un valor superior quedan descartadas

x: valor del indicador que corresponde a "Core Damage Frequency"

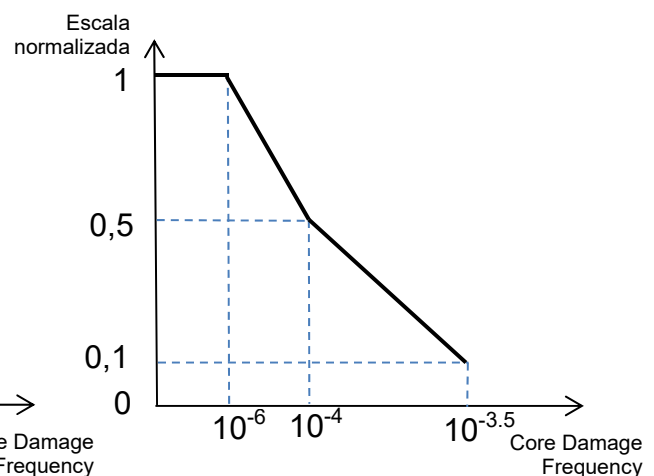
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 1: Escala Normalizada Experto del Indicador de Seguridad Nuclear



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 2: Escala Normalizada Experto Ajustada del Indicador de Seguridad Nuclear



Fuente: Elaboración propia

Tabla 12: Descripción Cualitativa de Niveles del Indicador Seguridad Nuclear

Nivel alto de Seguridad Nuclear	La seguridad nuclear de esta tecnología es evaluada como muy segura dado bajo nivel probabilístico de accidente.
Nivel medio de Seguridad Nuclear	La seguridad nuclear de esta tecnología es evaluada con un nivel medio de seguridad dado su nivel intermedio de probabilidades de accidente.
Nivel bajo de Seguridad Nuclear	La seguridad nuclear de esta tecnología es evaluada con un nivel bajo de seguridad dado su nivel de probabilidades de accidente.

Fuente: Elaboración propia

Indicador Seguridad Nuclear de Ciclotrones

Para el caso de ciclotrones se considerará una medición de la escala INES en relación al impacto en un accidente que podría pasar de acuerdo a un proyecto tipo de una instalación equivalente.

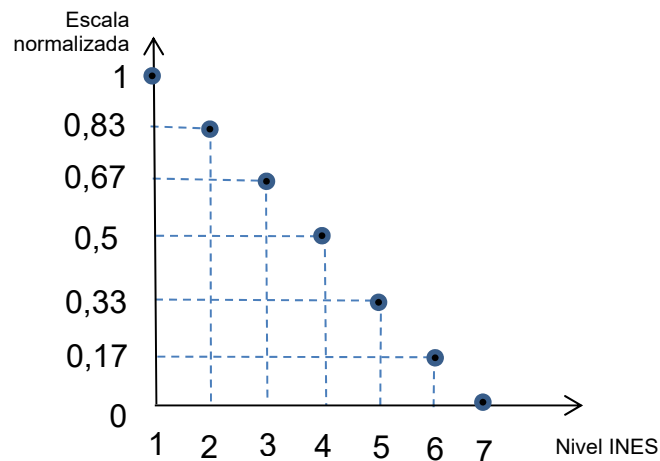
Tabla 13: Umbrales de Indicador Seguridad Nuclear para Ciclotrones

Nombre y Fórmula	Umbrales	Valorización normalizada experto	Valorización Normalizada ajustada experto	Significado
Nivel de Seguridad La variable X representa el nivel máximo en accidente alcanzable por esta tecnología según la escala INES	x= 1 Anomalía	1	No requerida dado que los valores normalizados del experto son discretos	Nivel alto de seguridad nuclear
	x= 2 Incidente	0,83		Nivel medio alto de seguridad nuclear
	x= 3 Accidente serio	0,67		Nivel medio superior de seguridad nuclear
	x= 4 Accidente con consecuencias locales	0,5		Nivel medio de seguridad nuclear
	x= 5 Accidente con consecuencias regionales	0,33		Nivel medio inferior de seguridad nuclear
	x= 6 Accidente serio	0,17		Nivel medio bajo de seguridad nuclear
	x= 7 Accidente mayor	0,00		Nivel bajo de seguridad nuclear

x: valor del indicador. El valor corresponde un valor de un accidente.

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3: Escala Normalizada del Indicador Evaluación de Seguridad en Ciclotrones



Fuente: Elaboración propia

3.5.4.1.2 Indicadores para el criterio técnico de segundo nivel de Protección Radiológica

Indicador de Protección Radiológica.

Se hará uso del concepto de Dosis del Personal Ocupacionalmente Expuesto (POE) para la definición del indicador de Protección Radiológica. Este concepto se refiere a la radiación acumulada por un periodo de tiempo que puede recibir una persona por concepto laboral. Para efectos legales, se ha fijado el REGLAMENTO DE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA DE INSTALACIONES RADIATIVAS (CChEN5, 1985) y sus actualizaciones. En estos documentos se establecen las medidas de protección personal radiológicas y los límites de dosis radiactivas que pueden recibir las personas ocupacionalmente expuestas, para prevenir y evitar la sobreexposición a las radiaciones ionizantes y sus efectos en la salud. En este conjunto de documentos legales se establecen los límites de dosis anuales de acuerdo a la siguiente información.

- Dosis efectiva de 20 mSv anuales promediada durante cinco años consecutivos (100 mSv en 5 años), y de 50mSv en un año cualquiera;
- Una dosis equivalente en el cristalino de 20 mSv anuales promediada durante cinco años consecutivos (100 mSv en cinco años), y de 50 mSv en un año cualquiera;
- Una dosis equivalente en las extremidades (manos y pies) o en la piel de 500 mSv en un año.

De acuerdo a estos antecedentes se desarrolla el indicador de protección radiológica en base a la máxima dosis anual equivalente estimada para el POE de la instalación nuclear de la actividad.

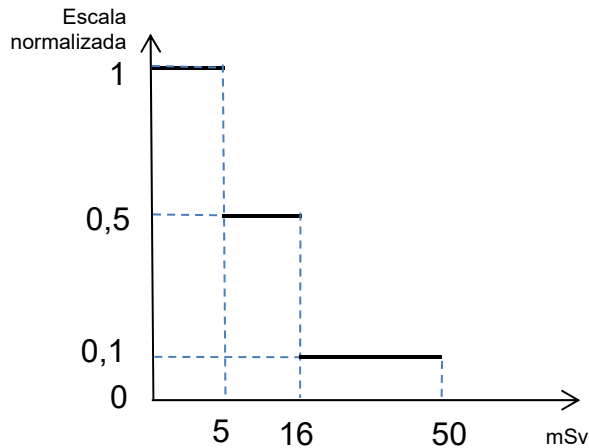
Tabla 14: Umbrales del Indicador Protección Radiológica

Nombre y Fórmula	Umbrales mSv/Anual	Valorización normalizada experto	Valorización Normalizada ajustada experto	Significado
Nivel de Protección Radiológica	$5 \geq x$	1	1	Nivel alto de protección radiológica
	$16 \geq x > 5$	1	$f(x) = -0,04545 * X + 1,22727$	Nivel medio de protección radiológica
Máxima Dosis de un POE	$50 \geq x > 16$	0,5	$f(x) = -0,01176 * X + 0,68824$	Nivel bajo de protección radiológica
	$x > 50$	N/A	N/A	Filtro, los proyectos con estos niveles de dosis de radiación para los máximos POE quedan descartados

x: valor del indicador que corresponde a la dosis equivalente medida en mSv.

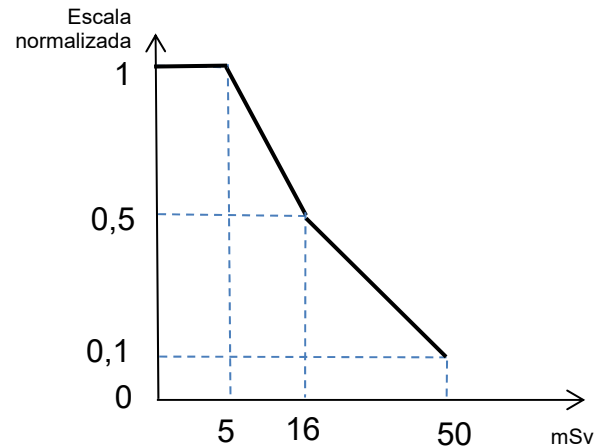
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4: Escala Normalizada Experto del Indicador de Protección Radiológica



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 5: Escala Normalizada Experto Ajustada del Indicador de Protección Radiológica



Fuente: Elaboración propia

Tabla 15: Descripción Cualitativa de Niveles del Indicador de Protección Radiológica

Nivel alto de protección radiológica	La protección radiológica de esta tecnología permite una operación muy segura con una dosis anual equivalente máxima para un operador de 5 mSv
Nivel medio de protección radiológica	La protección radiológica de esta tecnología permite una operación segura con una dosis anual equivalente máxima para un operador entre 5 y 16 mSv
Nivel bajo de protección radiológica	La protección radiológica de esta tecnología permite una operación segura con un dosis anual equivalente máxima para un operador entre 16 y 50 mSv

Fuente: Elaboración propia

3.5.4.1.3 Indicador para el criterio técnico de primer nivel de Emplazamiento

Indicador nivel adecuado de Emplazamiento

La selección del sitio para las cuatro alternativas de continuidad operacional tiene aspectos diferentes a evaluar, ya que tres de ellas plantean el uso de sitios con resguardos especiales y, en el caso de un ciclotrón, no se requieren los mismos niveles de exigencia para la selección del sitio. Las primeras alternativas se pueden homologar a un sitio nuevo para un reactor, para reevaluar los cambios demográficos en los sitios existentes y otros parámetros para su selección. Para el caso del ciclotrón los requisitos no son necesarios dado que no trabaja con material nuclear del mismo nivel que un reactor obteniendo una puntuación máxima.

La selección de sitios se realiza en base a requisitos excluyentes y criterios de evaluación basados en ranking. Los elementos a considerar en la evaluación de un reactor nuclear de investigación están descritos en el documento “Safety of Research Reactor” cuyo código es “SSR-3” del IAEA (IAEA6, 2016).

En este documento se consideran los siguientes aspectos

- Los efectos de eventos externos naturales y humanos inducidos (por ejemplo, eventos sísmicos, incendios o inundaciones) que pueden ocurrir en el sitio;
- Las características del lugar y su entorno que podrían influir en la transferencia de materiales radiactivos liberados a seres vivos;
- Se debe considerar la densidad de población y distribución de esta y otras características en la vecindad como emergencias locales, riesgos para los individuos y la población;
- Otras instalaciones cercanas como otros reactores de investigación, plantas de radioisótopos, instalaciones relacionadas con el ciclo del combustible, exámenes post-irradiación o instalaciones no nucleares (por ejemplo, instalaciones químicas);
- Capacidad para extraer el calor residual;
- Los planes de emergencia in situ y fuera del sitio tienen por objeto mitigar las consecuencias para el público y el medio ambiente en caso de una liberación sustancial de material radiactivo al medio ambiente.

Estos puntos sino pueden ser superados con elementos de diseño, serán excluyentes para la alternativa, considerados, por lo tanto, como filtros del modelo AHP.

Los eventos externos a considerar en el estudio del sitio para un reactor nuclear de investigación son:

- Terremotos, volcanes y fallas superficiales;
- Eventos meteorológicos como rayos, tornados y ciclones;
- Inundaciones, se incluyen olas inducidas por terremotos o fenómenos geológicos, inundaciones causadas por fallas en estructuras de agua;
- Riesgos geotécnicos, incluyendo la inestabilidad de la pendiente, colapso, hundimiento o levantamiento de la superficie del sitio, y licuefacción del suelo;
- Eventos externos inducidos por el ser humano (presentes y futuros), incluyendo incidentes relacionados con la seguridad, eventos de transporte, como accidentes de aviones y accidentes en las actividades circundantes, como explosiones químicas.

Se desarrolla el siguiente indicador para la selección de sitio.

Tabla 16: Ítems del indicador Emplazamiento tipo Ranking

N°	Criterio	Filtro Requisito o Ranking	Requisito		Ranking	Medio de Verificación
			Si	No		
1	Zona libre de movimientos sísmicos	< Aceleración 6g	X		X	Estudio sismológico
2	Zona libre de volcanismos cercano	>=10 Km	X		X	Estudio volcánico
3	Zona libre de fallas cercanas	>= 1 Km	X		X	Estudio sismológico
4	Zona libre de tormentas eléctricas	>= 1 Km	X		X	Estudios meteorológicos
5	Zona libre de inundaciones naturales	>= 10 Km	X		X	Estudio geológico
6	Zona libre de inundaciones no naturales	>= 10 Km	X		X	Estudio urbano rural
7	Zona libre de deslizamiento de tierras, levantamiento de tierra y licuefacción	>= 5 Km	X		X	Estudio geológico
8	Zonas libres de eventos producidos por el hombre incidentes				X	Estudio urbano rural
	Accidentes de transporte Terrestre	>= 1 Km			X	Estudio urbano rural
	Accidentes de transporte Aéreo	>= 5 Km			X	Estudio urbano rural
	Accidentes industriales	>= 5 Km			X	Estudio urbano rural

Fuente: Elaboración propia

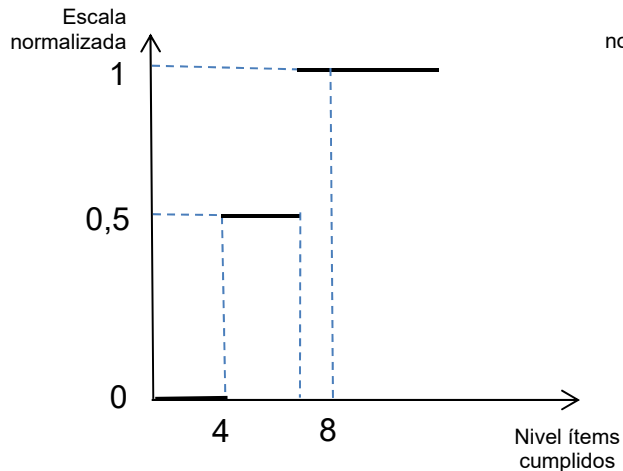
Tabla 17: Umbrales del Indicador Emplazamiento

Nombre y Fórmula	Ítem cumplidos	Valorización normalizada experto	Valorización Normalizada ajustada experto	Significado
Nivel de Emplazamiento	$x \geq 8$	1	1	Nivel alto de emplazamiento
Requisitos cumplidos	$8 > x \geq 4$	0,5	0, 125 x	Nivel medio de emplazamiento
	$4 > x$	0,0	0, 125 x	Nivel bajo de emplazamiento

x: valor del indicador

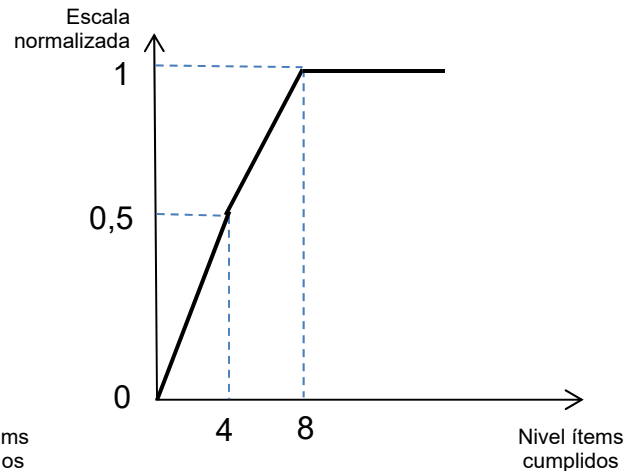
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 6: Escala Normalizada Experto del Indicador de Emplazamiento



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 7: Escala Normalizada Experto Ajustada del Indicador de Emplazamiento



Fuente: Elaboración propia

Para este tipo de indicador es necesario destacar que existen restricciones legales asociadas al uso a nivel de suelos establecidos principalmente por planificaciones a nivel nacional (Servicio de Evaluación Ambiental, 2012) que interactúan como filtros para el modelo AHP. Estas planificaciones son lideradas por el Ministerio de Vivienda y Urbanismo y la Ley General de Urbanismo y Construcciones. Se hace uso de los Instrumentos de Planificación Territorial (IPT) para definir el uso de suelos como:

- Plan Regional de Desarrollo Urbano
- Plan Regulador Intercomunal o Metropolitano
- Plan Regulador Comunal
- Plan Seccional
- Limite Urbano

Junto a los IPT se encuentran los Instrumentos de Orden Territorial (IOT) los cuales consisten en procesos o instrumentos de planificación, de carácter técnico-político-administrativo, con el cual se define a largo plazo, la organización y ocupación del territorio. Algunos IOT son:

- Plan Regional de Ordenamiento Territorial
- Zonificación del Borde Costero
- Áreas de Desarrollo Indígena

3.5.4.2 Indicadores para el criterio estratégico Aspectos de Desarrollo

3.5.4.2.1 Indicadores para el criterio técnico de primer nivel Ambiental

Indicador para el criterio técnico de segundo nivel Impacto en la etapa de construcción

Indicador nivel de Impacto en la construcción

La construcción de una central nuclear de investigación es un proceso equivalente al de una central termoeléctrica dado que el uso de materiales son del tipo convencional. Una etapa posterior incluye la incorporación de combustible nuclear lo que cambia su gestión.

Dado que no existe normativa relacionada con impactos ambientales en la construcción para una central nuclear de investigación se tomará como referencia “GUIA PARA LA EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL DE CENTRALES DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA CON BIOMASA Y BIOGAS”, (Servicio de Evaluación Ambiental, 2012)

En Chile existe una gran cantidad de normativa asociada a partes, obras, acciones, emisiones, residuos y sustancias peligrosas. Estas normas que se listan a continuación las que actúan como filtro para el modelo AHP, es decir, su incumplimiento u omisión en los antecedentes del proyecto deberían dejarlo fuera como alternativa válida. Listado de normativa aplicable:

El DS N° 144, de 1961, del Ministerio de salud, establece normas para evitar emanaciones o contaminantes atmosféricos de cualquier naturaleza. Se justifica su aplicación, dada la generación de emisiones atmosféricas producto, entre otros, del movimiento de tierra, tránsito de vehículos, y funcionamiento de maquinarias.

El DS N° 138, de 2005, del Ministerio de Salud, establece la obligación de declarar las emisiones que señala. Se justifica su aplicación dado la generación de emisiones por parte de fuentes fijas que correspondan a los rubros, actividades o tipo indicados en la norma. Esta se aplica a las calderas generadores de vapor y/o agua caliente, cuyo consumo energético de combustible sea igual o superior a un mega joule por hora y a equipos electrógenos de potencia mayor a 20kW.

El DS N° 38, de 2011, del Ministerio de Medio, establece la norma de emisión de ruidos por fuentes emisoras.

El DS N° 47, de 1992, del Ministerio de Vivienda y Urbanismo, establece la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones. Esta norma regula ruido, polvo, material, ruido, accesos a faena que cuenten con pavimentos estables, transporte de carga con cubierta, lavado de lodo de las ruedas de los vehículos de faena.

El DS N° 236, de 1926, del Ministerio de Higiene, Asistencia, Previsión Social y Trabajo considera el reglamento de alcantarillados particulares, fosas sépticas, cámaras filtrantes, cámaras absorbentes y letrinas domiciliarias.

El Decreto con Fuerza de Ley N° 725, de 1967, del Ministerio de Salud, que incluye el Código Sanitario. Se debe respetar la prohibición de descargar las aguas servidas y los residuos industriales o mineros en ríos o lagunas, o en cualquiera otra fuente o masa de agua que sirva para proporcionar agua potable en alguna población, para riego o para balneario, sin que antes se proceda a su depuración en la forma que se señale en los reglamentos.

El DS N° 90, de 2000, del Ministerio Secretario General de la Presidencia, establece norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales.

El DS N° 609, de 1998, del Ministerio de Obras Públicas, establece norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos industriales líquidos a sistemas de alcantarillado.

El DS N° 594, de 1999, del Ministerio de Salud, establece reglamento sobre Condiciones Sanitarias y Ambientales Básicas en los Lugares de Trabajo.

El DS N° 75, de 1987, del Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones, establece condiciones para el transporte de cargas que indica. El transporte de materiales capaces de escurrir o generar polvo.

El Decreto Ley N° 3.557, de 1981, establece disposiciones sobre protección agrícola.

El DS N° 148, de 2003, del Ministerio de Salud, Reglamento sanitario sobre manejo de residuos peligrosos. Trata sobre la generación de residuos como lubricantes, combustibles para motores y otros.

El DS N° 298, de 1994, del Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones, reglamento de transporte de carga peligrosa por calles y caminos.

El DS N° 78, de 2009, del Ministerio de Salud, Reglamento de almacenamiento de sustancias peligrosas.

El Decreto con fuerza de ley N° 1.122, de 1981, del Ministerio de Justicia, relacionado con el código de aguas. La intervención de causas de agua debe realizarse con la aprobación previa de la Dirección General de Aguas.

La ley N° 20.283 establece normativa sobre recuperación del bosque nativo y fomento forestal. El DS N° 93, de 2008, del Ministerio de Agricultura, establece el Reglamento General de la ley sobre recuperación de bosque nativo y fomento forestal.

El DS N° 82, de 2010, del Ministerio de Agricultura, establece el Reglamento de suelos, aguas y humedales.

El Decreto de Ley N° 701, de 1974, fija régimen legal de los terrenos forestales o preferentemente aptos para la forestación y establece normas de fomento sobre materia y sus modificaciones.

La Ley N° 18.378, deroga la Ley N° 15.020 y el Decreto con Fuerza de ley N°R.R.A. 26, de 1963 y establece sanciones que señala. Esto trata de intervención de árboles y arbustos aislados ubicados en lugares específicos del territorio según decretos dictados de acuerdo a esta ley.

La ley N° 4.601, establece las disposiciones por que se regirá la caza en el territorio de la República. El DS N° 5, de 1998, del Ministerio de Agricultura, esto es el Reglamento de la Ley de Caza. Esto se justifica en la habilitación de caminos de acceso, instalaciones de faenas y/o otras obras en zonas en las que habitan especies de fauna silvestre protegida.

La ley N° 17.288, Legisla sobre Monumentos Nacionales, se establece el Reglamento respectivo, sobre excavaciones y/o prospecciones arqueológicas, antropológicas y paleontológicas.

Para efectos en el impacto en la construcción de un reactor de investigación nuclear o ciclotrón se considerará los metros cuadrados utilizados de suelo. Deberán considerarse todas las instalaciones anexas necesarias como edificio auxiliar, radioquímica, talleres y piscina circuito secundario. Se tomará como referencia el Reactor Nuclear de la Reina para el cual se utilizó cerca de 4.000 m². Para el caso del ciclotrón del Centro Nuclear de la Reina se consideran 300 m².

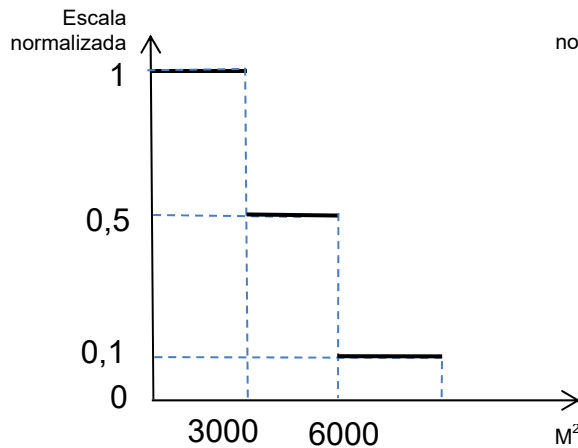
Tabla 18: Umbrales del Indicador Impacto en la Construcción

Nombre y Fórmula	Umbrales M ²	Valorización normalizada experto	Valorización Normalizada ajustada experto	Significado
Nivel de Impacto en la Operación	3000 < x	1	1	Nivel alto en gestión por construcción
	3000 ≤ x < 6000	0,5	f(x) = -0,00017*X + 1,5	Nivel medio en gestión por construcción
	6000 ≤ x < 9000	0,1	f(x) = -0,00013*X + 1,3	Nivel medio en gestión por construcción
	9000 ≤ x			Filtro

x: valor del indicador que corresponde a los m² de uso de suelo.

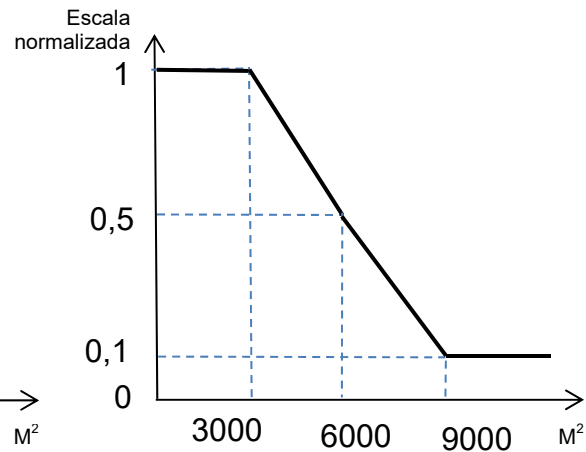
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 8: Escala Normalizada Experto del Indicador Impacto en la Construcción



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 9: Escala Normalizada Experto Ajustada del Indicador Impacto en la Construcción



Fuente: Elaboración propia

Indicador para el criterio técnico de segundo nivel Impacto en la operación

Casi la totalidad de las variables de operación de un reactor nuclear de investigación que impactan en la operación al medio ambiente se encuentran controladas a través de los diseños de ingeniería y procedimientos de operación.

A partir de la opinión experta un buen elemento a considerar son las resinas de intercambio iónico las que son ampliamente utilizadas en los centros de investigación nuclear, plantas nucleares de potencia, plantas de procesamiento y otras instalaciones para absorber material radiactivo diluidos en fluidos para hacer manejable el volumen de los desechos radiactivos (Laili, 2010).

En el caso de un reactor nuclear de investigación las resinas de intercambio iónico son usadas en el circuito primario de refrigeración de un reactor, sistema de gestión de desechos líquidos y limpieza de la piscina de combustible desgastado. Las resinas desde el punto de vista ambiental contienen productos de fisión y activación que deben ser gestionados. Entre los productos se encuentran ^{137}Cs (30 años de vida media), ^{90}Sr (29 años de vida media), ^{60}Co (5.3 años de vida media), ^{106}Ru (1 año de vida media) y ^{54}Mn (0.85 años de vida media). Se puede considerar que los desechos a manejar para un reactor de investigación como el de PUSPATI son de 50 Kg/año.

Para el desarrollo del indicador de Impacto en la Operación se considerará la cantidad resina generada como un desecho de media actividad²⁰.

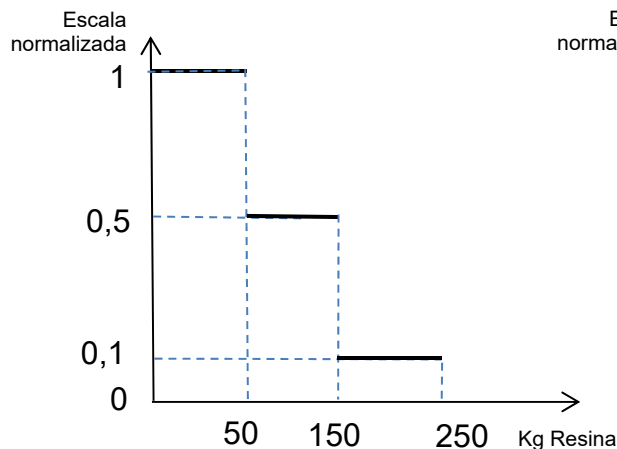
Tabla 19: Umbrales del Indicador Impacto en la Operación

Nombre y Fórmula	Umbrales Kg de resina de intercambio iónico generado	Valorización normalizada experto	Valorización Normalizada ajustada experto	Significado
Nivel de Impacto en la Operación	$x < 50$	1	1	Buen nivel en el impacto en la operación
	$50 \leq x < 150$	0,5	$f(x) = -0,005 \cdot X + 1,25$	Nivel medio en el impacto en la operación
	$150 \leq x < 250$	0,1	$f(x) = -0,004 \cdot X + 1,1$	Nivel bajo en el impacto en la operación
	$250 < X$	N/A	N/A	Filtro, los proyectos con estos niveles quedan descartados

x: valor del indicador que corresponde a los Kg de resina de intercambio iónico.

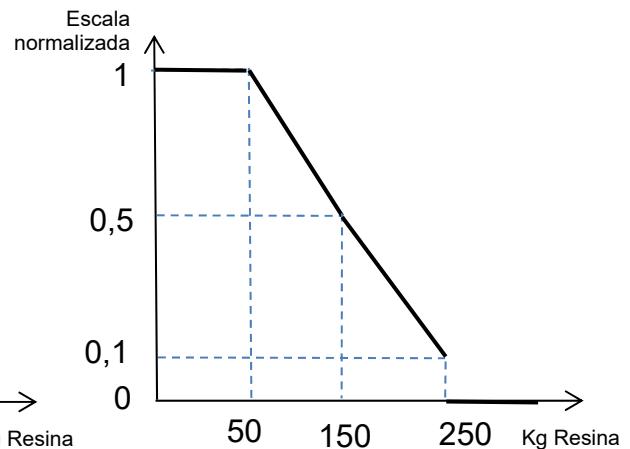
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 10: Escala Normalizada Experto del Indicador Impacto en la Operación



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 11: Escala Normalizada Experto Ajustada del Indicador Impacto en la Operación



Fuente: Elaboración propia

²⁰ Los desechos nucleares son clasificados como alta, media y baja actividad según Organismo Internacional de Energía Atómica (IAEA1, 2009). Esta clasificación se refiere al calor que emiten el cual está en relación con los niveles de radiación que emiten.

Indicador para el criterio técnico de segundo nivel Impacto en el desmantelamiento

Los objetivos de un desmantelamiento de un reactor nuclear en relación a los edificios, estructuras y fundaciones, son:

- Remover los materiales activados y contaminados del reactor
- Mantener los límites radiactivos de los desechos al mínimo razonable
- Mantener el costo del desmantelamiento tan bajo como sea posible
- Restringir el uso de la construcción para futuros usos no deseados

Los objetivos del desmantelamiento con respecto a la gente y el medio ambiente, son:

- Proteger al personal de exposiciones no deseadas
- Aplicar las medidas de protección física al personal y medio ambiente
- Tomar las medidas necesarias para prevenir la contaminación y dispersión de contaminación
- Proteger al ambiente de las amenazas de los procesos de desmantelamiento

La fuente de estos objetivos se encuentra en el documento “Selección y Uso de Indicadores en el Desmantelamiento” (IAEA7, 2011).

De los indicadores planteados estos se aplicaron en el caso real del reactor de investigación de Austria.

Se considera adecuado hacer uso del inventario radiactivo donde se puede hacer uso del periodo medio de decaimiento promedio de los radionúclidos. Para el caso se estos tenían una vida media en su mayoría de 80 días lo cual permite un desmantelamiento inmediato.

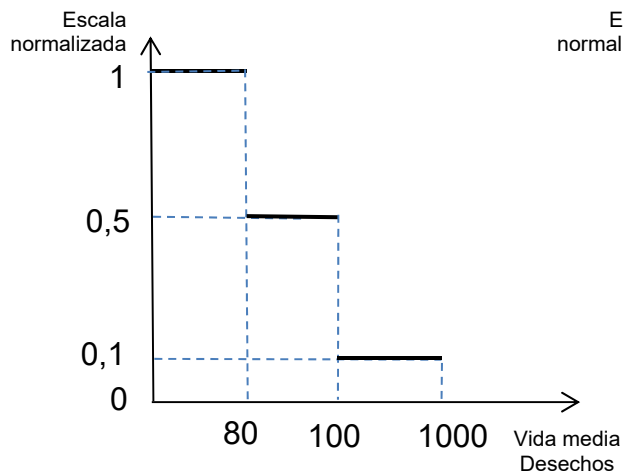
Tabla 20: Umbrales del Indicador Impacto en el Desmantelamiento

Nombre y Fórmula	Umbrales Vida media promedio de los radionúclidos de los residuos	Valorización normalizada experto	Valorización Normalizada ajustada experto	Significado
Nivel de vida media de los radionúclidos de los residuos por desmantelamiento	$x < 80$	1	1	Nivel alto en la gestión del desmantelamiento
	$80 \leq x < 100$	0,5	$f(x) = -0,025 \cdot X + 3$	Nivel medio en la gestión del desmantelamiento
	$100 \leq x < 1000$	0,1	$f(x) = -0,00044 \cdot X + 0,544444$	Nivel medio en la gestión del desmantelamiento
	$1000 < x$	N/A	N/A	Filtro, los proyectos con estos niveles quedan descartados

x: valor del indicador que corresponde a la vida media de los radionúclidos.

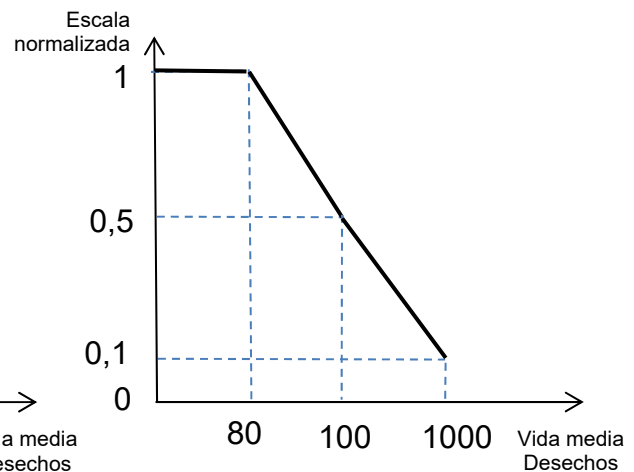
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 12: Escala Normalizada Experto del Indicador Impacto en el Desmantelamiento



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 13: Escala Normalizada Experto Ajustada del Indicador Impacto en el Desmantelamiento



Fuente: Elaboración propia

Tabla 21: Descripción Cualitativa de los Niveles del Indicador Impacto en el Desmantelamiento

Nivel alto en gestión por el desmantelamiento	Los desechos presentan principalmente radionúclidos que son de vida media baja lo cual implica una pronta gestión en el largo plazo
Nivel medio en gestión por el desmantelamiento	Los desechos presentan principalmente radionúclidos que son de vida media lo cual no permite una gestión inmediata
Nivel bajo en gestión por el desmantelamiento	Los desechos presentan principalmente radionúclidos que son de vida media alta lo cual implica una gestión de los desechos extendida en el tiempo

Fuente: Elaboración propia

3.5.4.2.2 Indicadores para el criterio técnico de primer nivel Económico

Indicadores para el criterio técnico de segundo nivel Índices Económicos

El primer indicador corresponde al VAN Social donde predomina la perspectiva del conjunto país (sociedad). Es necesario considerar que un proyecto que es rentable para un privado no siempre será rentable para la sociedad y lo mismo en una relación inversa. A modo resumen la evaluación social se elimina las transferencias entre agentes eliminándose algunas partidas del flujo de caja. Esta diferencia aumenta al considerar efectos indirectos y externalidades. Otro elemento diferenciador de la evaluación es el uso de los precios sociales en vez de los precios privados. Esto se hace porque los precios privados están distorsionados (Contreras, 2004)

A continuación, se presenta la formula y el nombre de la variables que participan en su cálculo

VAN Social

$$VAN = -I + \sum_{i=1}^n \frac{FN_i}{(1+r)^i}$$

Donde

I	Inversión
FN _i	Flujo neto en el periodo i
r	Tasa de retorno social
i	Periodo
n	Número de periodos

Para poder seleccionar los proyectos con mayor retorno social se hará el siguiente cálculo

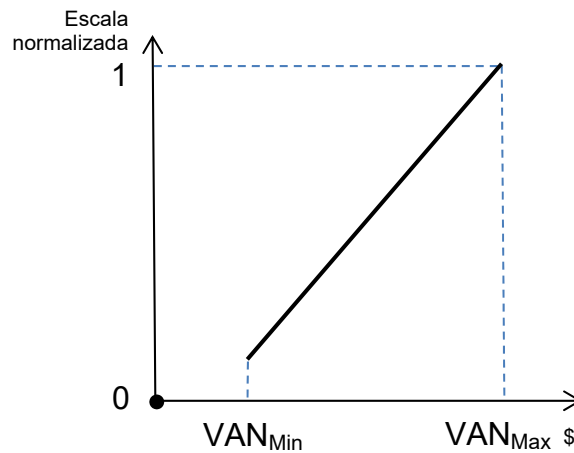
Tabla 22: Umbrales del Indicador VAN Social

Nombre y Fórmula	Umbrales	Valorización normalizada experto	Valorización Normalizada ajustada experto	Significado
$VAN = -I + \sum_{i=1}^n \frac{FN_i}{(1+r)^i}$	<p>VAN_{Max}: Mayor Valor Actualizado Neto de las alternativas</p> <p>VAN_{Min}: Menor Valor Actualizado Neto de las alternativas</p>	$F(VAN_k) = \frac{VAN_k}{VAN_{Max}}$ <p>k: corresponde a la alternativa en evaluación</p>		Normalización de VAN a partir del valor de las alternativas
	$VAN \leq 0$			Aquellos proyectos que no presenten un VAN Social mayor o igual que cero serán descartados. Podrán exceptuarse aquellos que tengan estudios incompletos.

x: valor del indicador que corresponde a los m² de uso de suelo.

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 14: Escala Normalizada del Indicador VAN Social



Fuente propia

IVAN

El IVAN conocido como el Índice de Valor Actual Neto es un indicador que se utiliza para medir el retorno de la inversión para la priorización sobre una cartera de proyectos cuando hay restricciones de capital. A continuación se presenta su fórmula:

$$IVAN = \frac{VAN}{I}$$

Donde

VAN : Valor actualizado neto
I : Inversión

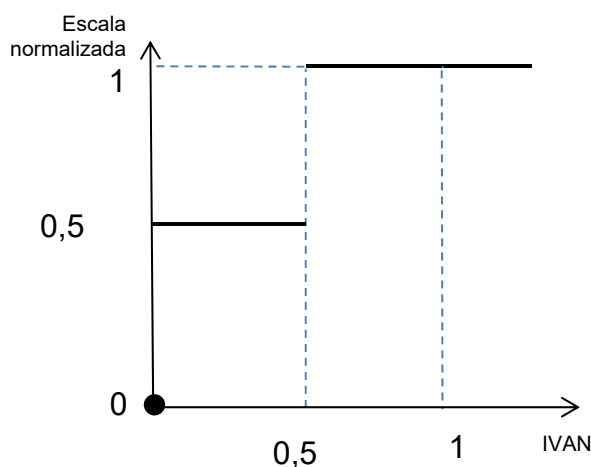
Tabla 23: Umbrales del Indicador IVAN

Nombre y Fórmula	Umbrales IVAN	Valorización normalizada experto	Valorización Normalizada ajustada experto	Significado
IVAN: Índice de Valor Actual Neto $\frac{VAN}{I}$	$x > 1$	1	1	Nivel alto de retorno de la inversión
	$1 \geq x > 0,5$	1	$f(x) = X$	Nivel medio de retorno de la inversión
	$0,5 \geq x > 0$	0,5	$f(x) = X$	Nivel bajo de retorno de la inversión
	$0 > X$	N/A	N/A	Filtro, los proyectos con estos niveles quedan descartados

x: valor del indicador IVAN.

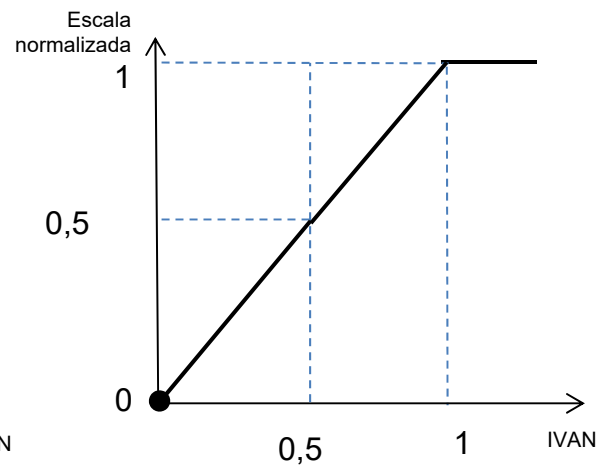
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 15: Escala Normalizada Experto del Indicador IVAN



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 16: Escala Normalizada Experto Ajustada del Indicador IVAN



Fuente: Elaboración propia

Indicadores para el criterio técnico de segundo nivel Sensibilidad

Se considerará para este indicador el nivel de sensibilidad que tienen las variables de la evaluación social del proyecto en el VAN Social. Se considera la variación porcentual de la variable y como esta afecta a la variación porcentual del VAN social acumulado a la segunda variable de aquellas de mayor impacto.

$$Sensibilidad_k = \sum_{i=1}^2 Variación VAN_{ik}$$

Donde

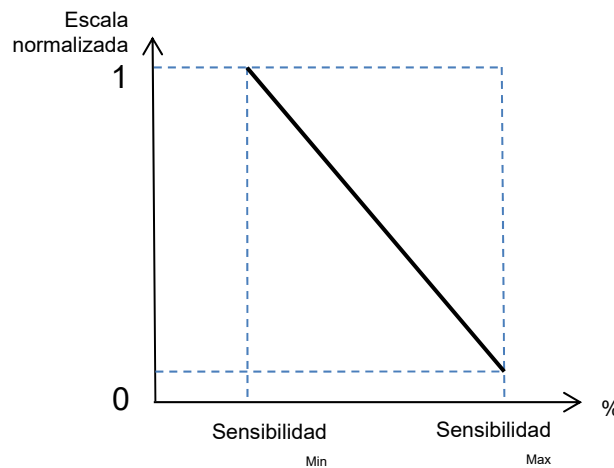
$Variación VAN_{ik}$: Variación porcentual acumulada del VAN de las mayores variaciones del VAN Social de la i variables de la alternativa k

Tabla 24: Umbrales del Indicador Sensibilidad

Nombre y Fórmula	Umbrales	Valorización normalizada experto	Valorización Normalizada ajustada experto	Significado
<p>$Sensibilidad$</p> $= \sum_{i=1}^2 Variación VAN_{ik}$ <p>i: Es la variación porcentual sobre el VAN Social de la variable i k: Es la alternativa en evaluación</p>	<p>Sensibilidad_{Max}: Mayor Valor</p> <p>Sensibilidad_{Min}: Menor Valor</p>	$F(Sensibilidad_k) = \frac{Sensibilidad_{Min k}}{Sensibilidad_k}$ <p>k: corresponde a la alternativa en evaluación</p>	<p>Normalización del indicador Sensibilidad a partir del valor de las alternativas</p>	
	N/A			Sin Filtro

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 17: Escala Normalizada del Indicador Sensibilidad



Fuente: Elaboración propia

3.5.4.3 Indicadores para el criterio estratégico Aspectos de Lineamientos de Dirección

3.5.4.3.1 Indicadores para el criterio técnico de primer nivel de Investigación y Desarrollo

La CCHEN ha desarrollado casi la totalidad de las aplicaciones pacíficas de la energía nuclear que se conocen en el mundo (CChEN6).

Entre estas aplicaciones se encuentran los radioisótopos aplicados a la medicina, minería, industria y agricultura, Para estos últimos se conoce la técnica como trazadores radiactivos para fluidos, detección de fugas y estudios de agua.

Se realizan aplicaciones de radiación a sangre humana para transmisiones en personas inmunodeprimidas, e irradiación de huesos y piel para trasplantes.

Se realiza la aplicación de irradiación de alimentos y materiales primas para esterilización y descontaminación de productos para consumo humanos o fabricación de otros productos.

Se utilizan técnicas nucleares para el control de plagas como lo es la mosca de fruta. Se irradian gusanos de tebo lo cual permite su exportación con diversos fines.

Los reactores nucleares de investigación son utilizados para investigación básica, producción de radioisótopos, rayos y radiografía de neutrones, caracterización y pruebas de materiales. También sirven para el entrenamiento y educación en tecnología nuclear.

Los ciclotrones producen elementos radiactivos para equipos médicos sofisticados para diagnóstico médico y radioterapia.

Es importante destacar que el insumo más importante para lograr el nivel de investigación desarrollado en la CChEN lo constituye su capital humano. Entre ellos, 13 funcionarios poseen el grado de doctor. Durante el año 2016 se llevaron a cabo 43 proyectos en ciencias básicas, investigación y desarrollo. En este mismo año se llevaron a cabo 19 publicaciones científicas ISI contribuyendo el Departamento de Aplicaciones Nucleares con la mitad y el resto por el Departamento de Plasma Termonuclear y el Departamento de Materiales Nucleares.

Indicador para el criterio técnico de segundo nivel Aplicaciones Nucleares

En la CChEN se ha medido históricamente la investigación a través del número de publicaciones. Para poder medir el impacto en la organización de la inversión de la alternativa tecnológica se han considerado el número de líneas de investigación existentes y potenciales relacionadas con la alternativa en evaluación en el área de las aplicaciones nucleares que no se relacionen con Plasma Termonuclear.

Indicador Aplicaciones Nucleares

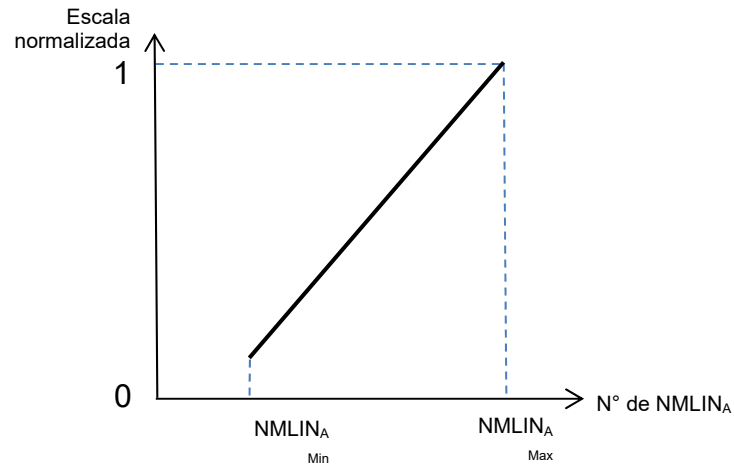
Nuevas líneas de investigación o mejoras significativas a las existentes en Aplicaciones Nucleares (NMLIN_A)

Tabla 25: Umbrales del Indicador NMLIN_A

Nombre y Fórmula	Umbrales	Valorización normalizada experto	Valorización Normalizada ajustada experto	Significado
N° de NMLIN _A K: Es la alternativa en evaluación	NMLIN _{A Max} : Mayor Valor NMLI _{A Min} : Menor Valor	$F(NMLIN_{A k}) = \frac{NMLIN_{A k}}{NMLIN_{A Max}}$ k:corresponde a la alternativa en evaluación		Normalización del indicador Potenciales nuevas líneas de investigación o mejoras significativas a las existentes en Aplicaciones Nucleares a partir del valor de las alternativas
	N/A			Sin Filtro

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 18: Escala Normalizada del Indicador NMLIN_A



Fuente: Elaboración propia

Indicador para el criterio técnico de segundo nivel Plasma Termonuclear

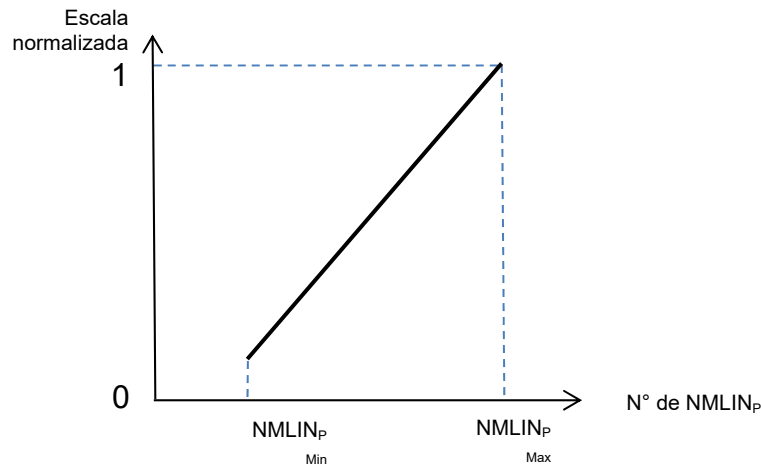
Potenciales nuevas líneas de investigación o mejoras significativas a las existentes en Plasma Termo Nuclear (NMLIN_P).

Tabla 26: Umbrales del Indicador NMLIN_P

Nombre y Fórmula	Umbrales	Valorización normalizada experto	Valorización Normalizada ajustada experto	Significado
N° de NMLIN _P K: Es la alternativa en evaluación	NMLIN _P Max: Mayor Valor NMLIN _P Min: Menor Valor	$F(NMLI_{P k}) = \frac{NMLIN_{P k}}{NMLIN_{P Max}}$ k: corresponde a la alternativa en evaluación		Normalización del indicador Potenciales nuevas líneas de investigación o mejoras significativas a las existentes en Plasma Termo Nuclear a partir del valor de las alternativas
	N/A			Sin Filtro

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 19: Escala Normalizada del Indicador NMLI_p



Fuente: Elaboración propia

Indicador para el criterio técnico de segundo nivel de Transferencia Tecnológica

La CChEN se ha preocupado de la transferencia tecnológica fortaleciéndola a través de su coordinación profesional e integrada por medio de la División de Investigación y Aplicaciones Nucleares. Es por eso que en el año 2016 se crea la primera oficina de Transferencia y Licenciamiento Tecnológico nuclear. En esta línea destacan la inscripción de derechos de autor. Para efectos del desarrollo del indicador se considerará los aspectos relacionados con medicina nuclear. La incorporación de nuevos radioisótopos no producidos en el país plantea la creación de una nueva demanda o una no satisfecha en el mercado. Junto con esto se plantea un desafío CChEN de transferencia de conocimiento hacia el mercado privado y público para poder hacer uso de este producto junto con la inversión en equipos médicos del consumidor.

Indicador Transferencia Tecnológica

Número de nuevos radioisótopos no producidos en el mercado Chileno (NNR)

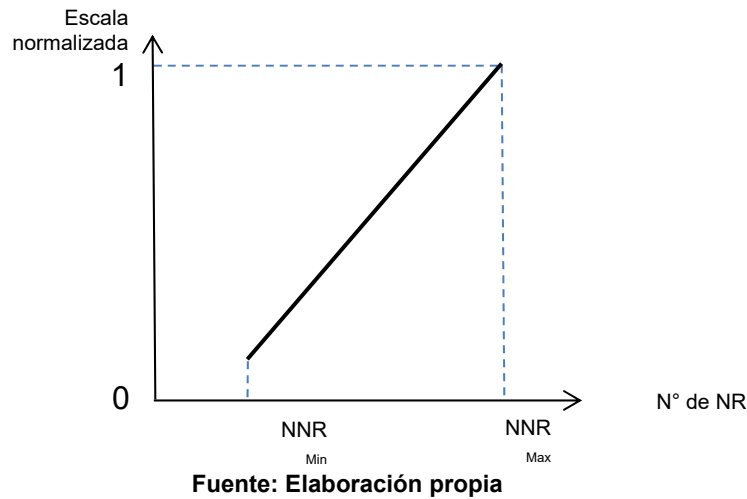
Tabla 27: Umbrales del Indicador Nuevos Radioisótopos no producidos en el mercado Chileno

Nombre y Fórmula	Umbrales	Valorización normalizada experto	Valorización Normalizada ajustada experto	Significado
N° de NNR _k K: Es la alternativa en evaluación	NNR _{Max} : Mayor Valor NNR _{Min} : Menor Valor	$F(NNR_k) = \frac{NNR_k}{NNR_{Max}}$ k: corresponde a la alternativa en evaluación		Normalización del indicador Nuevos Radioisótopos no producidos en el mercado a partir del valor de las alternativas
	N/A			Sin Filtro

Fuente: Elaboración propia

Escala de evaluación

Gráfico 20: Escala Normalizada del Indicador NNR



3.5.4.3.2 Indicadores para el criterio técnico de primer nivel de Producción y Servicios

En este caso, los productos de reactores nucleares de investigación y ciclotrones se evaluarán con los mismos indicadores. La mediciones de flujo neutrónico se puede obtener experimentalmente y mediante códigos de análisis como MONTECARLO (Hernández, 2003).

Indicador para el criterio técnico de segundo nivel Caracterización e Irradiaciones

Para las alternativas que consideren reactores nucleares de potencia se considera el indicador

$$\text{Indicador Caracterizaciones e Irradiaciones} = \frac{\frac{FNT+FNE+FNR}{3} + \text{Potencia del Reactor}}{2}$$

Para la alternativa de ciclotrón se considera como indicador

$$\text{Indicador Caracterizaciones e Irradiaciones} = \frac{NEP + NED}{2}$$

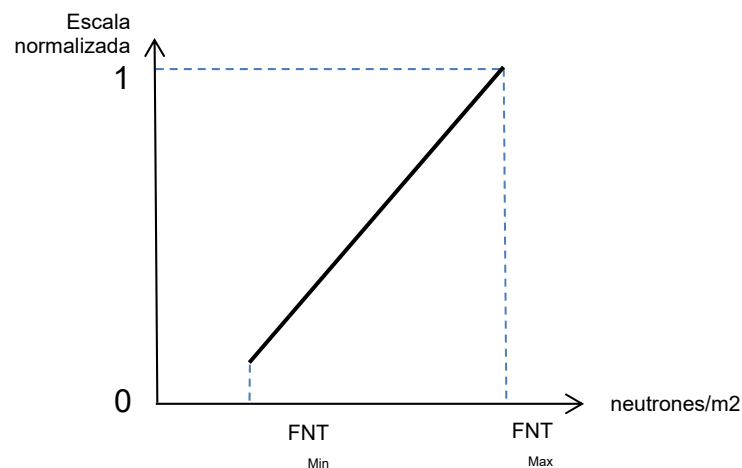
Los componentes de las fórmulas anteriores corresponden a valores normalizados, donde el Flujo Neutrones Térmicos (FNT) es medido en neutrones/m²s en posición ideal con uso de combustible de bajo enriquecimiento.

Tabla 28: Umbrales del Indicador Flujo de Neutrones Térmicos

Nombre y Fórmula	Umbrales	Valorización normalizada experto	Valorización Normalizada ajustada experto	Significado
FNT_k K: Es la alternativa en evaluación	FNT_{Max} : Mayor Valor FNT_{Min} : Menor Valor	$F(FNT_k) = \frac{FNT_k}{FNT_{Max}}$ k: corresponde a la alternativa en evaluación		Normalización del indicador de flujo de neutrones térmicos a partir del valor de las alternativas
	N/A	N/A		Sin Filtro

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 21: Escala Normalizada del Indicador FNT



Fuente: Elaboración propia

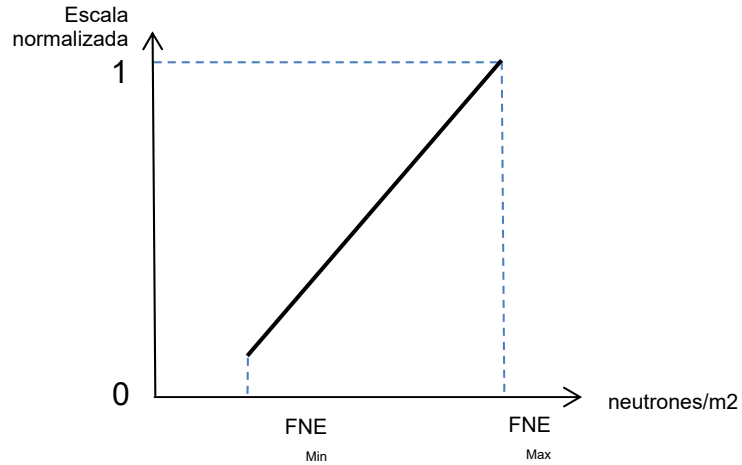
Donde el Flujo de Neutrones Epitérmicos (FNE) medido en neutrones/m2s en posición ideal con uso de combustible de bajo enriquecimiento.

Tabla 29: Umbrales del Indicador Flujo de Neutrones Epitérmicos

Nombre y Fórmula	Umbrales	Valorización normalizada experto	Valorización Normalizada ajustada experto	Significado
FNE_k K: Es la alternativa en evaluación	FNE_{Max} : Mayor Valor FNE_{Min} : Menor Valor	$F(FNE_k) = \frac{FNE_k}{FNE_{Max}}$ k: corresponde a la alternativa en evaluación		Normalización del indicador de flujo neutrónico epitérmico a partir del valor de las alternativas
	N/A	N/A		Sin Filtro

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 22: Escala Normalizada del Indicador FNE



Fuente: Elaboración propia

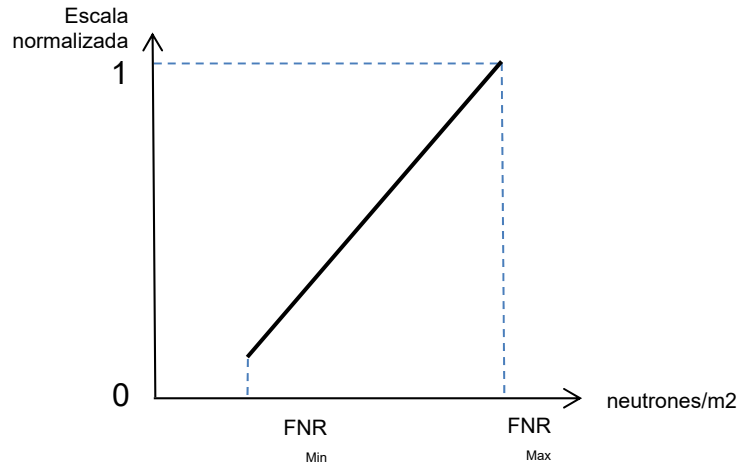
Donde el Flujo Neutrones Rápidos (FNR) medido en neutrones/m2s en posición ideal con uso de combustible de bajo enriquecimiento.

Tabla 30: Umbrales del Indicador Flujo de Neutrones Rápidos

Nombre y Fórmula	Umbrales	Valorización normalizada experto	Valorización Normalizada ajustada experto	Significado
FNR_k K: Es la alternativa en evaluación	FNR_{Max} : Mayor Valor FNR_{Min} : Menor Valor	$F(FNR_k) = \frac{FNR_k}{FNR_{Max}}$ k: corresponde a la alternativa en evaluación		Normalización del indicador de flujo neutrónicos rápidos a partir del valor de las alternativas
	N/A			Sin Filtro

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 23: Escala Normalizada del Indicador FNR



Fuente: Elaboración propia

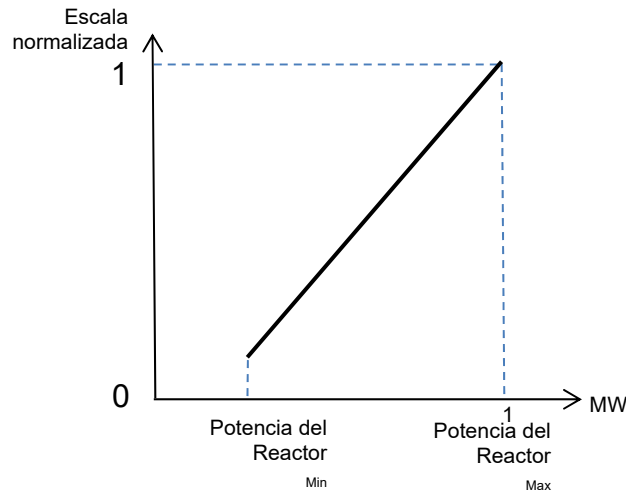
Falta agregar el indicador relacionado con la potencia del reactor potencia del reactor.

Tabla 31: Umbrales del Indicador Potencia del Reactor

Nombre y Fórmula	Umbrales	Valorización normalizada experto	Valorización Normalizada ajustada experto	Significado
Potencia Reactor k K: Es la alternativa en evaluación	Potencia Reactor $_{Max}$: Mayor Valor Potencia Reactor $_{Min}$: Menor Valor	$F(\text{Potencia Reactor}_k) = \frac{\text{Potencia Reactor}_k}{\text{Potencia Reactor}_{Max}}$ k: corresponde a la alternativa en evaluación		Normalización del indicador de potencia del reactor a partir del valor de las alternativas
	N/A			Sin Filtro

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 24: Escala Normalizada del Indicador Potencia del Reactor



Fuente: Elaboración propia

Para el caso del ciclotrón, no tiene alternativas de comparación por lo que se considerarán dos alternativas ficticias para la evaluación un ciclotrón 18 MeV y otro de 70 MeV las cuales corresponde a ciclotrones de mercado.

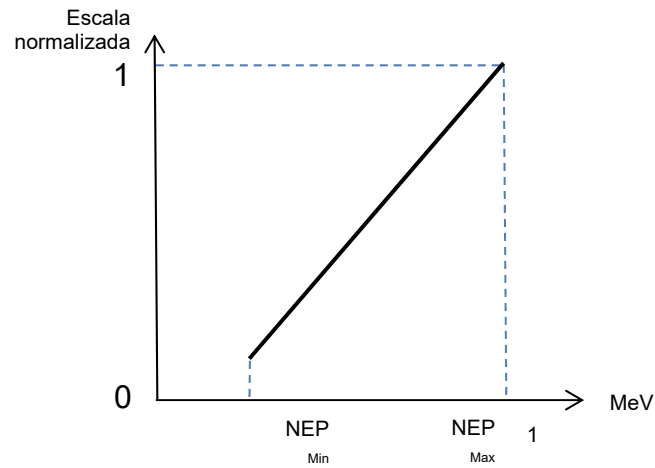
Donde el Nivel de Energía de Protones (NEP) es medido en MeV.

Tabla 32: Umbrales del Indicador Nivel de Energía de Protones

Nombre y Fórmula	Umbrales	Valorización normalizada experto	Valorización Normalizada ajustada experto	Significado
NEP_k K: Es la alternativa en evaluación	NEP_{Max} : Mayor Valor NEP_{Min} : Menor Valor	$F(NEP_k) = \frac{NEP_k}{NEP_{Max}}$ k: corresponde a la alternativa en evaluación		Normalización del indicador de nivel de energía de protones a partir del valor de las alternativas
	N/A			Sin Filtro

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 25: Escala Normalizada del Indicador NEP



Fuente: Elaboración propia

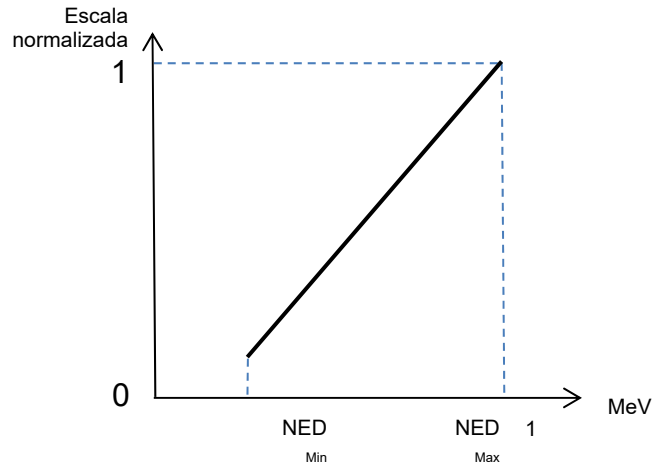
Donde el Nivel de Energía de Deutrones (NED) medido en MeV.

Tabla 33: Umbrales del Indicador Nivel de Energía de Deutrones

Nombre y Fórmula	Umbrales	Valorización normalizada experto	Valorización Normalizada ajustada experto	Significado
NED_k K: Es la alternativa en evaluación	NED_{Max} : Mayor Valor NED_{Min} : Menor Valor	$F(NED_k) = \frac{NED_k}{NED_{Max}}$ k: corresponde a la alternativa en evaluación		Normalización del indicador de nivel de energía de deuterones a partir del valor de las alternativas
	N/A			Sin Filtro

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 26: Escala Normalizada del Indicador NED



Fuente: Elaboración propia

Indicador para el criterio técnico de segundo nivel Producción de Radiofármacos

Se considera la demanda de la capacidad de producción potencial de cada una de las alternativas ponderada por una demanda aproximada de la participación del mercado.

Indicador Producción

$$= \sum_{i=1}^n \%Dem. Estimada Radiosotopo_{ik} * Radioisotopo Producido_{ik}$$

Donde

$\%Dem Estimada Radiosotopo_{ik}$: Porcentaje de demanda estimada del radioisótopo i de la alternativa k.

$Radioisotopo Producido_{ik}$: Variable dummy. Asume el valor de 1 si el radioisótopo i es producido por la alternativa k

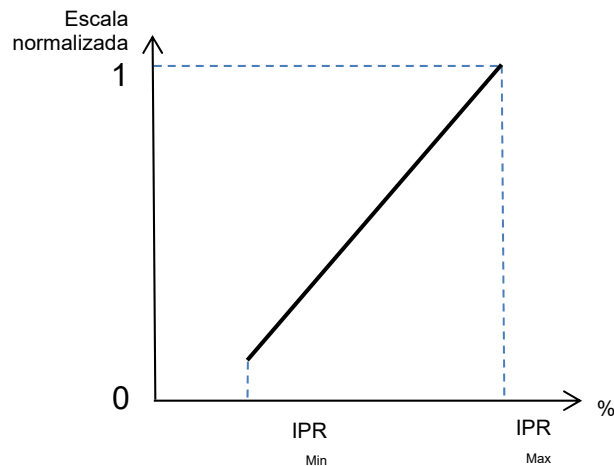
Indicador de Producción

Tabla 34: Umbrales del Indicador Producción

Nombre y Fórmula	Umbrales	Valorización normalizada experto	Valorización Normalizada ajustada experto	Significado
Indicador de Producción _k K: Es la alternativa en evaluación	Indicador de Producción _{Max} : Mayor Valor Indicador de Producción _{Min} : Menor Valor	$F(\text{Indicador de Producción}_k) = \frac{\text{Indicador de Producción}_k}{\text{Indicador de Producción}_{Max}}$ k: corresponde a la alternativa en evaluación		Normalización del indicador de producción a partir del valor de las alternativas
	N/A			Sin Filtro

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 27: Escala Normalizada del Indicador IPR



Fuente: Elaboración propia

Indicador para el criterio técnico de segundo nivel Servicios de Protección Radiológica

Tanto las alternativas de un reactor nuclear de investigación como un ciclotrón, no son clientes de servicios de protección radiológica. Es por ello que la construcción de los indicadores es hecho en este sentido. Se orientará al personal que requiere control dosimétrico y número de calibraciones para equipos de monitoreo radiológico. Este número no podrá ser manipulado y deberá venir validado por la autoridad reguladora del país de origen de la tecnología proveedora.

$$\text{Indicadores de Proyección Radiologica} = \frac{NPCD + NCA}{2}$$

Los componentes de la fórmula corresponden a los valores normalizados de los indicadores

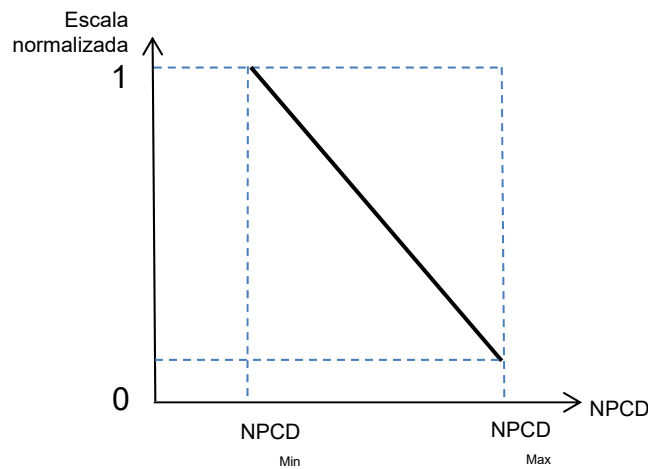
Indicador Número de Personas con Control Dosimétrico (NPCD)

Tabla 35: Umbrales del Indicador Número de Personas con Control Dosimétrico

Nombre y Fórmula	Umbrales	Valorización normalizada experto	Valorización Normalizada ajustada experto	Significado
$NPCD_k$ K: Es la alternativa en evaluación	$NPCD_{Max}$: Mayor Valor $NPCD_{Min}$: Menor Valor	$F(NPCD_k) = \frac{NPCD_{Min}}{NPCD_k}$ k: corresponde a la alternativa en evaluación		Normalización del indicador Número de Personas con Control Dosimétrico a partir del valor de las alternativas
	N/A			Sin Filtro

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 28: Escala Normalizada del Indicador NPCD



Fuente: Elaboración propia

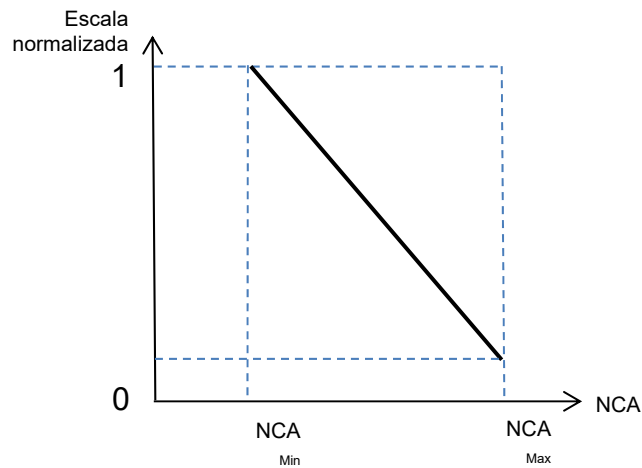
Indicador Número de Calibraciones Anuales (NCA)

Tabla 36: Umbrales del Indicador Número de Calibraciones Anuales

Nombre y Fórmula	Umbrales	Valorización normalizada experto	Valorización Normalizada ajustada experto	Significado
NCA_k K: Es la alternativa en evaluación	NCA_{Max} : Mayor Valor NCA_{Min} : Menor Valor	$F(NCA_k) = \frac{NCA_{Min}}{NCA_k}$		Normalización del indicador Número de Calibraciones Anuales a partir del valor de las alternativas
	N/A			Sin Filtro

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 29: Escala Normalizada del Indicador NCA



Fuente: Elaboración propia

3.5.4.3.3 Indicadores para el criterio técnico de primer nivel de Sociales

Para calcular la cobertura geográfica nacional, se requiere conocer la demanda de tratamiento por diagnóstico y prevención para tratamiento con radiofármacos para diferentes enfermedades. Debido a los esfuerzos realizados por el Ministerio de Salud se conoce el detalle de la demanda por prestaciones según sistema de salud para las enfermedades más comunes las cuales se encuentran codificadas (Ministerio de Salud de Chile, 2009). Para el caso del cáncer de mama se estima que la tasa de cáncer en el país para el año es de 50 y 100 por cada 100.000 mujeres mayores de 15, para FONASA e ISAPRE respectivamente, llegando a una demanda de 9.300 casos año. Dado que existen diferentes mecanismos para el tratamiento y diagnóstico del cáncer,

sólo una parte de estos podría ser tratada con los productos de la CChEN. Este puede ser tratado con T99m Dextran de 150 a 200 uCi. Este trabajo de relacionar la demanda con la producción de radiofármacos no se ha realizado y representa un desafío para el sector que permitirá mejorar la atención del ciudadano final.

Otra forma de abordar la cobertura regional corresponde a determinar la ubicación de las clínicas y hospitales con medicina nuclear en Chile.

Figura 24: Instalaciones de primera Categoría de Nivel País



Fuente: CChEN

En la figura anterior se puede apreciar que la medicina nuclear tradicional se encuentra disponible en todo el territorio de Chile.

Dado que estas formas de cobertura no se asocian directamente a las alternativas de continuidad operacional. Se considerará una cobertura de acuerdo a las técnicas disponibles a nivel mundial y las que podrían considerarse para la alternativa tecnológica. Este indicador es similar a los niveles de producción pero acá se separan si se utilizan para tratamiento y/o diagnóstico.

Indicador para el criterio técnico de segundo nivel Cobertura por Tratamiento

Indicador Cobertura Radioisótopos por Tratamiento (ICRT)

$$ICRT = \sum_{i=1}^n \%Demanda\ Radioisotopo_{ik} * RadioisotopoProducido_{ik}$$

Donde

$\%Demanda\ Radiosotopo_{ik}$: Porcentaje de demanda del radioisótopo i de la alternativa k.

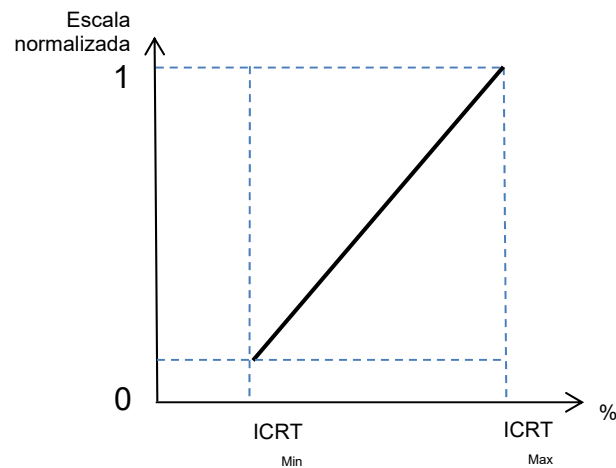
$RadioisotopoProducido_{ik}$: Variable dummy. Asume el valor de 1 si el radioisótopo i es producido por la alternativa k

Tabla 37: Umbrales del Indicador Cobertura de Radioisótopos por Tratamiento

Nombre y Fórmula	Umbrales	Valorización normalizada experto	Valorización Normalizada ajustada experto	Significado
$ICRT_k$ K: Es la alternativa en evaluación	$ICRT_{Max}$: Mayor Valor $ICRT_{Min}$: Menor Valor	$F(ICRT_k) = \frac{ICRT_k}{ICRT_{Max}}$ k: corresponde a la alternativa en evaluación		Normalización del indicador Cobertura de Radioisótopos por Tratamiento a partir del valor de las alternativas
	N/A			Sin Filtro

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 30: Escala Normalizada del Indicador ICRT



Fuente: Elaboración propia

Indicador para el criterio técnico de segundo nivel Cobertura por Prevención

Indicador Cobertura Radioisótopos por Prevención (ICRP)

$$ICRP = \sum_{i=1}^n \%Demanda\ Radioisotopo_{ik} * RadioisotopoProducido_{ik}$$

Donde

$\%Demanda\ Radioisotopo_{ik}$: Porcentaje de demanda del radioisótopo i de la alternativa k .

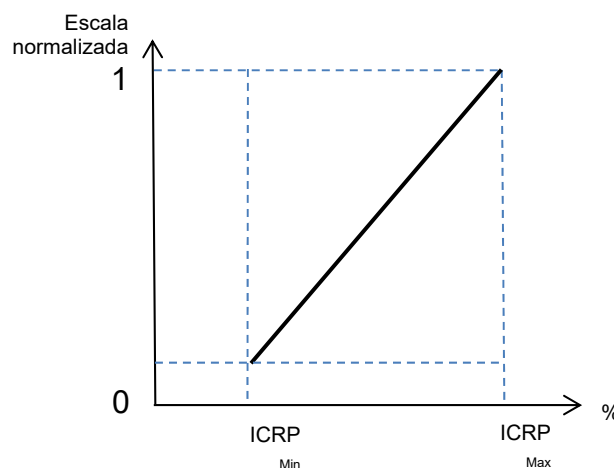
$RadioisotopoProducido_{ik}$: Variable dummy. Asume el valor de 1 si el radioisótopo i es producido por la alternativa k

Tabla 38: Umbrales del Indicador Cobertura de Radioisótopos por Prevención

Nombre y Fórmula	Umbrales	Valorización normalizada experto	Valorización Normalizada ajustada experto	Significado
$ICRP_k$ K: Es la alternativa en evaluación	$ICRP_{Max}$: Mayor Valor $ICRP_{Min}$: Menor Valor	$F(ICRP_k) = \frac{ICRP_k}{ICRP_{Max}}$ k: corresponde a la alternativa en evaluación		Normalización del indicador Cobertura de Radioisótopos por Prevención a partir del valor de las alternativas
	N/A			Sin Filtro

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 31: Escala Normalizada del Indicador ICRP



Fuente: Elaboración propia

3.5.4.4 Indicadores para el criterio estratégico Aspectos de Riesgo

3.5.4.4.1 Indicadores para el criterio técnico de primer nivel Técnicos

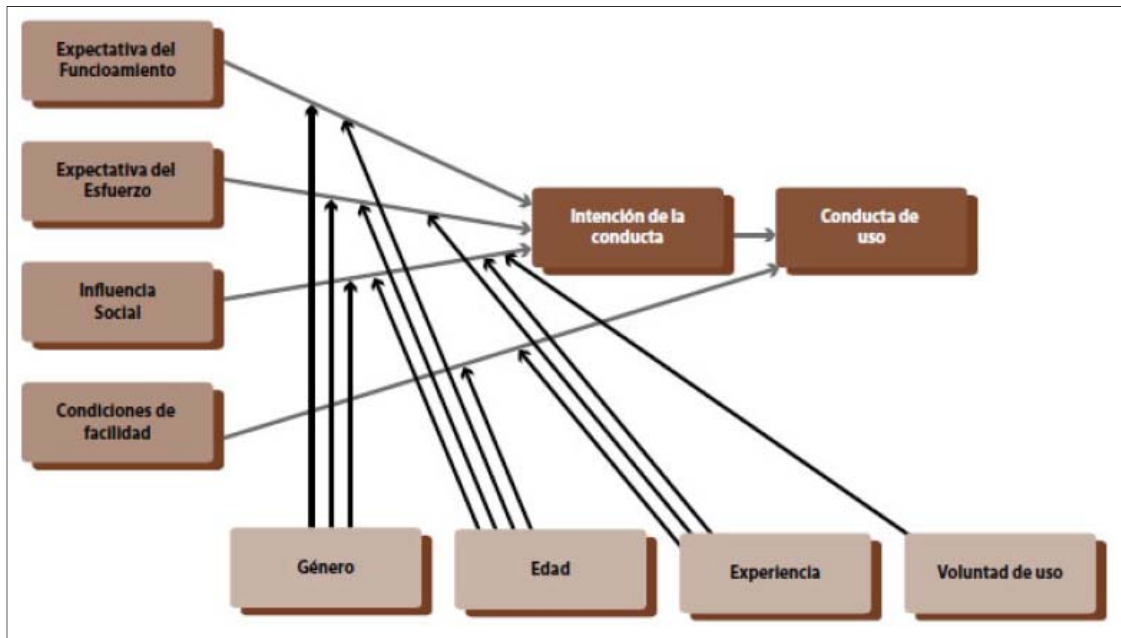
Indicador para el criterio técnico de segundo nivel Confiabilidad de la Tecnología

La confiabilidad en el sector nuclear está marcada por aspectos sociales, políticos, culturales y económicos de nivel global. En la sociedad se distinguen tres grupos: aquellos que están favor, los indiferentes y los que están en contra. En el grupo de aquellos que están favor encontramos a un grupo técnico que está marcado por un desarrollo tecnológico de los años 50 y 60. El surgimiento del tercer grupo se ha debido a la aparición en los 70 de movimientos antinucleares dado los incidentes nucleares acaecidos. A pesar que la investigación en el sector nuclear ha sido muy activa la renovación de los reactores nucleares de potencia no ha sucedido.

En el documento “Legitimidad cultural y luchas enmarcadas en los viajes de innovación: una perspectiva cultural-performativa y un estudio de caso de la energía nuclear holandesa”, (Geels, 2011), se menciona que para que una tecnología sea implantada debe ser aceptada por la sociedad. Este concepto de aceptación se basa en tres entornos: a) Entorno empresarial, en el que las tecnologías deben integrarse en las industrias y mercados pertinentes, b) el entorno de la reglamentación, en el que las tecnologías deben ajustarse a las normas, y, c) una sociedad amplia, en la que las tecnologías deben ser aceptadas por el público general ajustándose a las creencias sociales existentes. El primer entorno se refiere a la viabilidad económica, el segundo y tercer ambiente se refiere a la legitimidad regulatoria y cultural.

La UTAUT, Teoría Unificada de la Aceptación de la Tecnología, se aborda la aceptación tecnológica (Madera, 2012) poniendo de relieve un modelo que explica como diferentes dimensiones configuran la aceptación de una tecnología de la información. El modelo, UTAUT, se muestra a continuación:

Figura 25: Teoría Unificada de la Aceptación de la Tecnología



Fuente: (Venkatesh, Morris, Davis, & Davis, 2003)

Este modelo considera elementos que se pueden aplicar más allá de las tecnologías de la información. UTAUT, identifica cuatro factores principales:

- Expectativas de funcionamiento: corresponde al grado en que una persona cree que el uso de la tecnología ayudará a obtener ganancias en su desempeño. Este factor se encuentra moderado por el género y la edad.
- Expectativa del esfuerzo: corresponde al grado de facilidad asociado al uso de la tecnología. Este factor se encuentra moderado por el género, la edad y la experiencia.
- Influencia social: corresponde al grado en que una persona percibe que otras personas importantes para él creen que debe usarse la tecnología. Este factor se encuentra moderado por el género, la edad, la experiencia y la voluntad de uso.
- Condiciones de factibilidad: corresponde al grado en que una persona percibe que la estructura organizacional y la infraestructura técnica pueden dar soporte al uso de la tecnología. Este factor se encuentra moderado por la edad y la experiencia.

Para calcular este indicador se propone el uso del modelo incorporando dos variables adicionales país y proveedor:

$$\text{Confiabilidad} = \text{UTAUT}(p_1, p_2, \dots, p_n, \text{país}, \text{empresak})$$

Donde

P_1, P_2, \dots, P_N : Parámetros normales

País_j: País j de origen de la tecnología nuclear

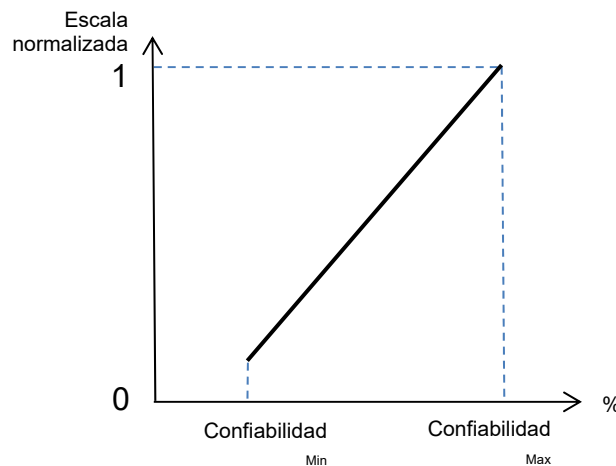
Empresa_k: Empresa k de tecnología nuclear

Tabla 39: Umbrales del Indicador Confiabilidad

Nombre y Fórmula	Umbrales	Valorización normalizada experto	Valorización Normalizada ajustada experto	Significado
$Confiabilidad = UTAUT(p_1, p_2, \dots, p_n, país, empresak)$	Confiabilidad _{Max} : Mayor Valor Confiabilidad _{Min} : Menor Valor	$F(Confiabilidad_k) = \frac{Confiabilidad_k}{Confiabilidad_{Max}}$ k:corresponde a la alternativa en evaluación		Normalización del indicador de Confiabilidad a partir del valor de las alternativas
	N/A			Sin Filtro

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 32: Escala Normalizada del Indicador Confiabilidad Tecnológica



Fuente: Elaboración propia

Indicador para el criterio técnico de segundo nivel Confiabilidad Proveedor de Repuestos

Los repuestos se consideran parte un sistema más grande que se relaciona con la gestión de activos, gestión integral del mantenimiento (terotecnología) o confiabilidad total. Para que una empresa sea competitiva debe tener confiabilidad operacional para poder llegar a la excelencia organizacional (Oliverio, 2007).

El objetivo principal de estos sistemas apuntan a

- Mejora de la productividad de la planta
- Aumento de la capacidad de los equipos
- Reducción de tiempos de mantenimiento
- Reducción de los tiempos de parada
- Reducción de fallas críticas y catastróficas
- Mayor seguridad del personal
- Cumplimiento de las entregas
- Alta calidad de los productos

Estos sistemas son integrales y se insertan en la planificación estratégica de las empresas.

Las centrales nucleares, tanto de potencia como de investigación, tienen largos ciclos de vida, cercanos a los 60 años. Esto implica que los repuestos de tipo eléctrico, mecánico y electrónico podrían pasar por procesos de mejora industrial que implique no contar con el repuesto necesario en los años siguientes. Para el caso de un ciclotrón, su tiempo de vida útil es menor, por lo tanto este cambio de generación en las tecnologías electrónicas por ejemplo no tendría este efecto.

En términos prácticos la gestión de repuestos podría centrarse en aquellos elementos críticos, basados en la experiencia de operación del reactor nuclear de investigación RECH1 de manufactura inglesa, y para el ciclotrón de 18 MeV de manufactura Belga del Centro Nuclear de La Reina. La alternativa de plataforma nuclear del proyecto debe considerar la compra y suministro de mantención, donde debe considerarse los sistemas, partes y componentes críticos, entregando un costo y tiempo de suministro mínimo en caso de requerirse, y la cantidad mínima de años que se suministrará mediante un acuerdo bilateral entre las naciones. En el caso de la electrónica, dado los costos de los componentes, es preferible mantener stock por todos los años de operación.

Los años de suministro de repuestos serán filtro para las ofertas. Para el caso de un reactor nuclear de investigación, será de 60 años, y para el caso de un ciclotrón será de 10 años.

Se considera para el indicador de Tiempo de Respuesta de suministro promedio de componentes críticos.

Indicador Tiempo de Respuesta Repuestos

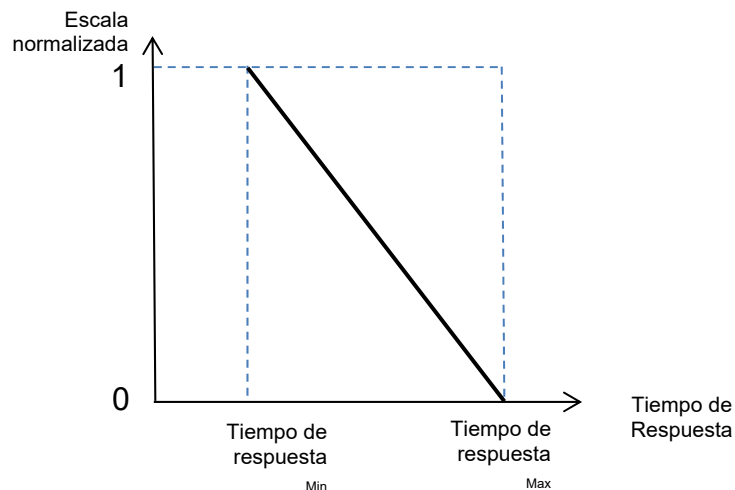
Tabla 40: Umbrales del Indicador Tiempo de Respuesta de Suministro

Nombre y Fórmula	Umbrales Días corridos	Valorización normalizada experto	Valorización Normalizada ajustada experto	Significado
Tiempo de respuesta de suministro	Tiempo de respuesta suministro Mayor Valor Tiempo de respuesta suministro Menor Valor	$F(\text{Tiempo de Respuesta}_k) = \frac{\text{Tiempo de respuesta}_k}{\text{Tiempo de respuesta}_{Min}}$ <p>k:corresponde a la alternativa en evaluación</p>		Normalización del indicador de Tiempo de Respuesta de suministro de respuesta promedio de repuesto críticos
	Número mínimo de años de suministro			Según tipo de tecnología

x: valor del indicador que corresponde a días corridos.

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 33: Escala Normalizada del Indicador Tiempo de Respuesta de Repuestos



Fuente: Elaboración propia

3.5.4.4.2 Indicadores para el criterio técnico de primer nivel Aceptación Pública

La Aceptación Pública es una preocupación permanente para la industria nuclear en la cual participan como Stakeholders a nivel mundial, el Organismo Internacional de Energía Atómica, proveedores de plantas nucleares, proveedores de tecnología nuclear, países que tienen reactores nucleares de potencia y países que no tienen reactores nucleares de potencia. La toma de decisiones del gobierno en esta materia

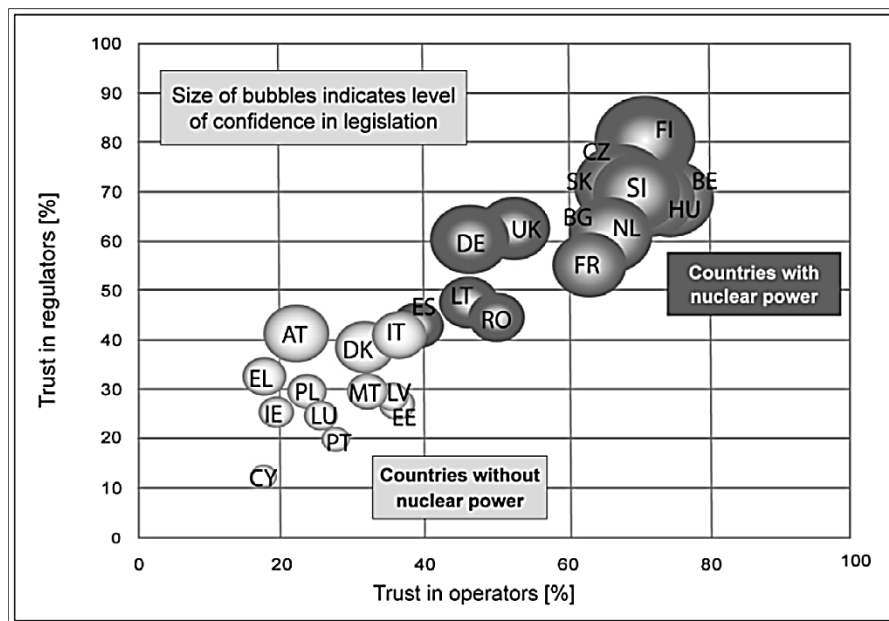
debe realizarse con el debido consenso entre los actores y el respaldo ciudadano (Seungkook, 2017). La tecnología nuclear tiene foco principalmente en las Centrales Nucleares de Potencia y en menor medida en los reactores nucleares de investigación. El resto de las aplicaciones nucleares como la medicina nuclear, trazadores radiactivos, gammagrafía, isótopos radiactivos ambientales, no representa un tema de agenda pública dado su impacto menor.

El Eurobarómetro de la organización de la Comisión Europea de investigación nuclear ha realizado un estudio sobre actitudes hacia la energía nuclear, descubriendo tendencias interesantes (NUCLEAR ENERGY AGENCY, 2010). Se menciona que la energía nuclear no es una de las mayores preocupaciones de los países miembros de la NEA, ocupando el tercer lugar en la preferencia de las tecnologías de generación eléctrica. La energía nuclear de potencia es más aceptada en aquellos países que ya la poseen y donde las personas con más educación la aceptan más. En este mismo estudio se menciona que principales preocupaciones son:

- Es posible operar una planta nuclear de potencia de manera segura
- El Terrorismo es una preocupación sobre este tipo de planta
- Los desechos nucleares pueden ser manejados en forma segura
- Los materiales nucleares están protegidos contra un mal uso

A continuación se muestra un gráfico donde se muestra la confianza en los reguladores, operadores y la legislación según países miembros de la NEA.

Figura 26: Confianza en reguladores nucleares, operadores y legislación



Fuente: (NUCLEAR ENERGY AGENCY, 2010)

Se han desarrollado varias y diferentes instrumentos para medir la aceptación pública, como la metodología planteada por el Eurobarometro, que corresponde a una encuesta basada en preguntas que lleva cerca de 20 años realizándose. También se plantean metodologías alternativas para obtener el nivel de aceptación, como el uso de Bigdata (Seungkook, 2017), basado en el uso de un software que permite realizar minería de datos en redes sociales.

El desarrollo de los instrumentos para medir el compromiso del gobierno central y la polarización de la discusión del proyecto corresponden a áreas específicas de la aceptación pública, donde los puntos de interés están puestos en contextos específicos identificados por los expertos.

Indicador para el criterio técnico de segundo nivel Compromiso Gobierno Central

El compromiso de nuestro país se ha demostrado en la realización de varios estudios serios que siguiendo la metodología de los Milestone (IAEA3 Nuclear Energy Series, 2015) se orientan a la toma de una decisión informada de iniciar o no un programa nuclear de potencia. Para efectos de este documento interesa medir el compromiso con proyectos que tienen que ver con reactores nucleares de investigación y ciclotrones para usos pacíficos en medicina nuclear e investigación respecto de las autoridades de nuestro país. El instrumento considera preguntas específicas según lo visto en el Eurobarometro las cuales utilizan una escala Likert que promediará sus resultados para su posterior normalización.

$$\text{Compromiso} = F(P1, P2, P3, P4)$$

Donde

- P1: Es posible operar la tecnología nuclear de la alternativa
- P2: El terrorismo podría afectar la tecnología nuclear de la alternativa
- P3: Los desechos pueden ser manejados para la alternativa de existir
- P4: Los materiales nucleares están protegidos para uso indebido.

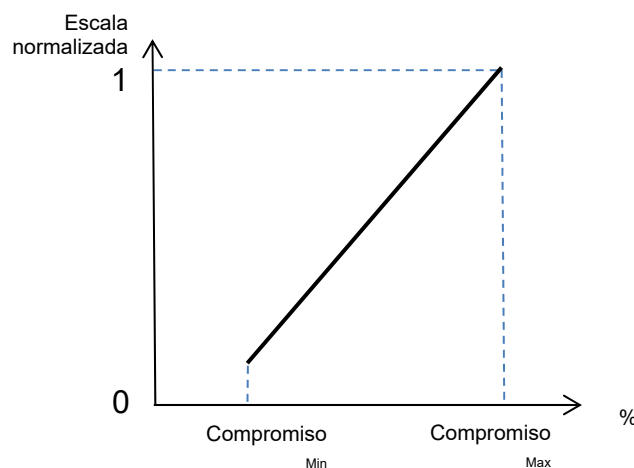
Indicador Compromiso del Gobierno Central

Tabla 41: Umbrales del Indicador Confiabilidad

Nombre y Fórmula	Umbrales	Valorización normalizada experto	Valorización Normalizada ajustada experto	Significado
$Compromiso = F(P1, P2, P3, P4, K)$ K: Es la alternativa en evaluación	Compromiso _{Max} : Mayor Valor Compromiso _{Min} : Menor Valor	$\frac{F(Compromiso_k)}{Compromiso_k}$ $= \frac{F(Compromiso_k)}{Compromiso_{Max}}$ k: corresponde a la alternativa en evaluación		Normalización del indicador de Compromiso a partir del valor de las alternativas
	N/A			Sin Filtro

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 34: Escala Normalizada del Indicador Compromiso



Fuente: Elaboración propia

Indicador para el criterio técnico de segundo nivel Polarización discusión proyecto

La polarización de la discusión en Chile se ha manifestado principalmente en proyectos de generación eléctrica de tipo hidroeléctrica, termoeléctricos y líneas de transmisión donde estos se han visto afectados en sus etapas de estudios avanzados y en etapas iniciales de construcción. Las fuentes se pueden encontrar en prensa y en informes de empresas del sector que analizan los desafíos del sector eléctricos como el Informe de Clasificación de Riesgo de (AES GENER S.A., 2017) y el informe de ERNC, perspectivas y dificultades: Chile (Deloitte, 2016).

En el informe de Deloitte se menciona que la causa principal tiene que ver con una falta de ordenamiento territorial. Es por esto que es necesario considerar las temáticas de aceptación pública mencionadas. Estos aspectos son:

- El proyecto impacta en la actividad humana del sector.
- El proyecto considera las prioridades locales.

El instrumento considera una consulta a los sectores potenciales.

$$Polarización = F(P1, P2)$$

Donde

P1: Impacto en la actividad humana del sector

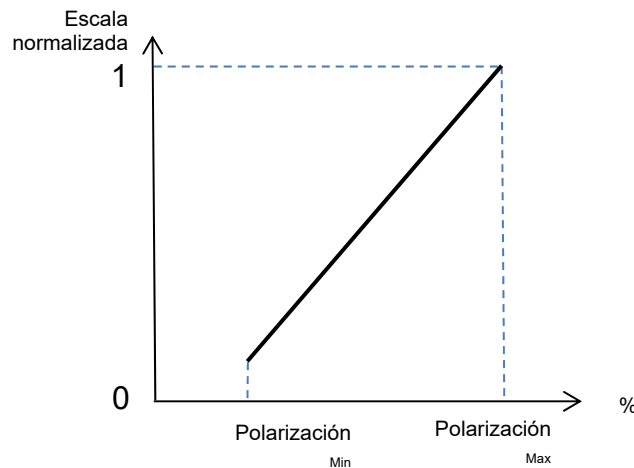
P2: Considera las prioridades locales.

Tabla 42: Umbrales del Indicador Polarización

Nombre y Fórmula	Umbrales	Valorización normalizada experto	Valorización Normalizada ajustada experto	Significado
$Polarización = F(P1, P2, K)$ K: Es la alternativa en evaluación	Polarización _{Max} : Mayor Valor Polarización _{Min} : Menor Valor	$\frac{F(Polarización_k)}{Polarización_k}$	$\frac{F(Polarización_k)}{Polarización_{Max}}$	Normalización del indicador de Polarización a partir del valor de las alternativas
	N/A			Sin Filtro

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 35: Escala Normalizada del Indicador Polarización



Fuente: Elaboración propia

4. Resultados

4.1 Análisis de Indicadores y Estandarización de Indicadores

En la siguiente tabla se aprecia el resumen de la simulación donde se han recopilado los valores de los indicadores desde diversas fuentes secundarias y ajustados por los valores de los expertos. La tabla muestra en las filas los criterios e indicadores. En las columnas se aprecian las diferentes alternativas RECH1, RECH2, RECH3 y CICLO2. Cada alternativa tiene una columna para el valor del indicador y luego su valor normalizado.

Tabla 43: Resumen de Indicadores y su normalización de los Aspectos de Seguridad

	Pesos	RECH1		RECH2		RECH3		CICLO2	
		Normalizado	Ponderado	Normalizado	Ponderado	Normalizado	Ponderado	Normalizado	Ponderado
Selección de alternativas de Infraestructura									
A) Aspectos de Seguridad									
A.1) Seguridad Nuclear	0,158	0,50	0,08	0,50	0,08	1,00	0,16	0,83	0,13
A.2) Protección Radiológica	0,094	0,95	0,09	1,00	0,09	1,00	0,09	1,00	0,09
A.3) Emplazamiento	0,153	0,88	0,13	1,00	0,15	1,00	0,15	1,00	0,15

Fuente: Elaboración propia

Se puede apreciar que en los aspectos de seguridad nuclear la opción RECH3 es aquella que es mejor valorada debido a sus sistemas modernos de seguridad. Las opciones de RECH1 y RECH2 son aquellas que puntúan menos debido a que el indicador Core Damage Frequency es menor en reactores nucleares de investigación más antiguos dado que sus sistemas de seguridad también lo son.

Para el caso de los aspectos de radiológica los valores son similares y para el caso de emplazamiento la única alternativa que puntúa menos es el RECH1.

Tabla 44: Resumen de Indicadores y su normalización de los Aspectos de Desarrollo

	Pesos	RECH1		RECH2		RECH3		CICLO2	
		Normalizado	Ponderado	Normalizado	Ponderado	Normalizado	Ponderado	Normalizado	Ponderado
Selección de alternativas de Infraestructura									
B) Aspectos de Desarrollo									
B.1) Ambiental									
B.1.1) N. Impacto Construcción	0,030	0,82	0,02	1,00	0,03	0,26	0,01	1,00	0,03
B.1.2) N. Impacto Operación	0,036	1,00	0,04	0,75	0,03	0,30	0,01	1,00	0,04
B.1.3) N. Impacto Desmantelamiento	0,052	0,63	0,03	0,63	0,03	0,68	0,04	1,00	0,05
B.2) Económico									
B.2.1) Índices Económicos	0,039	0,29	0,01	0,01	0,00	-	-	1,00	0,04
B.2.2) Sensibilidad	0,037	0,95	0,04	0,86	0,03	1,00	0,04	0,17	0,01

Fuente: Elaboración propia

En esta tabla se pueden apreciar los valores de los indicadores para el aspecto de desarrollo el cual incluye los criterios Ambiental y el Económico. En los aspectos ambientales destaca la mala valoración de la alternativa RECH3, el nuevo reactor de 30MW, en el impacto en la construcción debido a los m² construidos. De la misma forma la opción RECH3 también puntúa menos ya que es la que genera más resina de intercambio iónico. Al igual que en el impacto en operación la alternativa menos valorada en Impacto en el Desmantelamiento es RECH3. Esta vez se debe a que la actividad radiactiva de sus desechos nucleares son mayores.

En el Aspecto Económico las valoraciones han sido corregidas con valores simulados. Falta que los estudios consideren las transferencias y las externalidades considerando la valoración social de cada alternativa. RECH3 es la única alternativa que no pasa el filtro dado su alto nivel de inversión. En cuanto al aspecto de sensibilidad en el impacto en el VAN Social es la opción de CICLO2 la menos valorada debido a que los Ingresos por Ventas y el nivel de la inversión tienen un gran impacto en el proyecto cuando sus valores cambian en comparación con las otras alternativas.

Tabla 45: Resumen de Indicadores y su normalización de los Aspectos de Lineamiento Dirección Ejecutiva

	Pesos	RECH1		RECH2		RECH3		CICLO2	
		Normalizado	Ponderado	Normalizado	Ponderado	Normalizado	Ponderado	Normalizado	Ponderado
Selección de alternativas de Infraestructura									
C) Aspectos de Lineamiento DE									
C.1) I&D									
C.1.1) Aplicaciones Nucleares	0,033	0,50	0,02	0,50	0,02	1,00	0,03	0,29	0,01
C.1.2) Plasma Termonuclear	0,019	-	-	-	-	-	-	-	-
C.1.3) Transferencia Tecnológica	0,029	0,66	0,02	0,66	0,02	1,00	0,03	0,76	0,02
C.2) P&S									
C.2.1) Caracterización e Irradiaciones	0,018	0,13	0,00	0,16	0,00	1,00	0,02	0,43	0,01
C.2.2) Producción Radiofármacos	0,036	0,15	0,01	0,15	0,01	0,73	0,03	0,65	0,02
C.2.3) Servicios de Protección Radiológica	0,016	0,69	0,01	0,69	0,01	0,44	0,01	1,00	0,02
C.3) Sociales									
C.3.1) Cobertura por Tratamiento	0,032	0,78	0,02	0,78	0,02	1,00	0,03	0,44	0,01
C.3.2) Cobertura por Prevención	0,055	0,04	0,00	0,04	0,00	0,84	0,05	1,00	0,06

Fuente: Elaboración propia

En la tabla anterior se presenta los valores de los indicadores para el aspecto Lineamientos de Dirección Ejecutiva. El primer indicador relacionado con investigación de la opción RECH3 puntúa de mejor forma debido a que posee más líneas potenciales de aplicaciones nucleares que sus alternativas. La opción CICLO2 puntúa mal debido a que sólo participa en una sola potencial línea de investigación. Las alternativas no puntúan en relación a plasma ya que no contribuyen con sus líneas de investigación. En relación a transferencia la alternativa mejor valorada es CICLO2 debido a la cantidad de radioisótopos que se pueden producir en un ciclotrón que hoy no se usan actualmente.

En relación a producción y servicios la alternativa mejor valorada es RECH3 debido a sus grandes capacidades en tanto a flujo neutrónico como potencia. La alternativa de Ciclotrón, CICLO2, puntúa en forma moderada debido a que se compara con ciclotrones de menor capacidad y otro de mayor capacidad. En relación a la producción de radioisótopos la opción mejor valorada es RECH3 debido a que posee la producción de los isotopos con mayor demanda. En relación a protección radiológica la opción que puntúa más es el ciclotrón debido a que sus instalaciones requieren menor control dosimétrico y calibraciones de sensores.

En cuanto a los aspectos sociales nuevamente la alternativa de RECH3 es mejor valorada porque tiene la mayor cantidad de radioisótopos para prevención y tratamiento médico.

Tabla 46: Resumen de Indicadores y su normalización de los Aspectos de Riesgos

	Pesos	RECH1		RECH2		RECH3		CICLO2	
		Normalizado	Ponderado	Normalizado	Ponderado	Normalizado	Ponderado	Normalizado	Ponderado
Selección de alternativas de Infraestructura									
D) Aspectos de Riesgos									
D.1) Técnicos									
D.1.1) Confiabilidad de la Tecnología	0,034	0,80	0,03	0,20	0,01	0,60	0,02	0,70	0,02
D.1.2) Confiabilidad por Repuestos	0,019	0,25	0,00	0,25	0,00	0,25	0,00	1,00	0,02
D.2) Aceptación Pública									
D.2.1) Compromiso Gobierno Central	0,049	0,20	0,01	0,55	0,03	0,10	0,00	0,90	0,04
D.2.2) Polarización discusión proyecto	0,061	0,20	0,01	0,80	0,05	0,10	0,01	0,90	0,05
Evaluación			0,58		0,62		0,72		0,83

Fuente: Elaboración propia

En relación a la tabla anterior que muestra las valoraciones para el aspecto de riesgos en sus respectivos indicadores se puede decir que en temas técnicos la opción mejor valorada en la alternativa RECH1 y CICLO2 debido a su país de origen. Para la valoración de confiabilidad en repuestos de la alternativa CICLO2 es mejor debido a que presenta los mejores tiempos de respuesta en la entrega de repuestos e insumos.

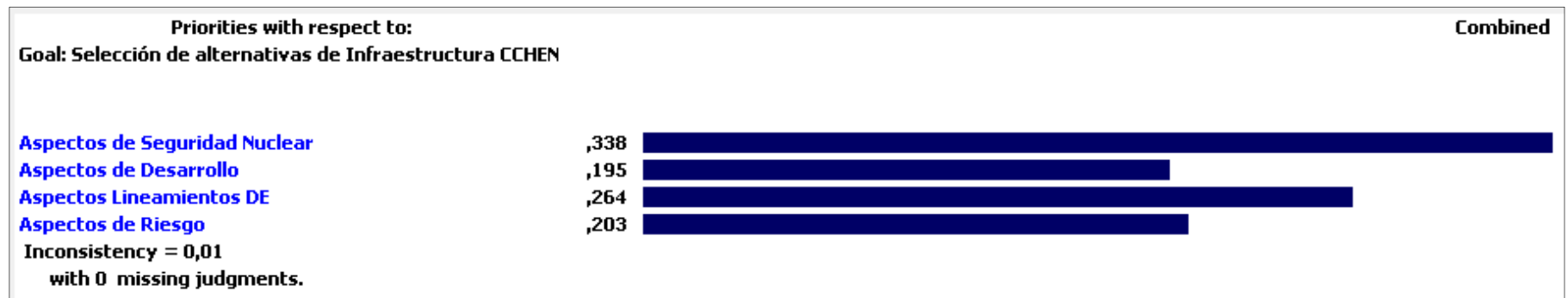
Para la Aceptación Pública podemos decir que el compromiso del Gobierno Central y Polarización de la discusión del proyecto son mejor valoradas para la alternativa CICLO2.

En la siguiente tabla se aprecia el ranking de las alternativas que se ordenan de la siguiente forma.

1. CICLO2
2. RECH3
3. RECH2
4. RECH1

Esto se debe a que los expertos valoran los criterios estratégicos en el siguiente orden: Aspectos de Seguridad Nuclear, Aspectos de Lineamientos Estratégicos, Aspectos de Riesgo y Aspectos de Desarrollo con 0.338, 0.264, 0.203 y 0.195. Destaca que la visión económica incorporada en aspectos de desarrollo puntúa con un valor menor en comparación con sus pares.

Figura 27: Promedios geométricos de las comparaciones de pares de los expertos



Fuente: Elaboración propia

5. Conclusión

El uso de la metodología multicriterio ha permitido definir, junto a los expertos de diferentes disciplinas, un conjunto de criterios estratégicos consensuados que permiten evaluar proyectos de tecnología nuclear. Estos criterios estratégicos se respaldan no sólo en la opinión directa de los expertos en tecnología nuclear, seguridad nuclear y de aspectos socioeconómicos, sino que en un marco conceptual de la teoría de decisiones del sector nuclear fundamentado en documentos del IAEA. Estos criterios se estructuran como un árbol jerárquico donde destacan los criterios estratégicos: Aspectos de Seguridad Nuclear, Aspectos de Desarrollo, Aspectos de Lineamientos de Dirección Ejecutiva y Aspectos de Riesgos en sus niveles superiores. Por otro lado, también se han identificado los criterios técnicos que dependen jerárquicamente de los anteriores: Seguridad Nuclear, Protección Radiológica, Emplazamiento, Ambiental, Económico, Investigación y Desarrollo, Producción y Servicios, Sociales, Aspectos de Riesgo Técnico y de Aceptación Pública.

El desarrollo de mecanismos de medición que permitieron enlazar con los criterios técnicos ha sido una tarea difícil y extensa. El enfoque de las mediciones establecidas en el área nuclear tiene como propósito conservar la fuente nuclear radiactiva y la seguridad de las personas. Al traducir estos a valores medibles comparables entre las líneas de tecnología nucleares analizadas también presentó un desafío importante. Los aspectos de desarrollo ambientales y económicos fueron un poco más simples de abordar, ya que existe mucho material y normativa relacionada. Los aspectos de Lineamiento de Dirección Ejecutiva de Investigación y Desarrollo, Producción y Servicios, y Sociales, fueron abordados con respecto de las tecnologías nucleares presentes en las alternativas tomando en cuenta como impactaban en el espectro de aplicaciones nucleares existentes, líneas investigación y desarrollo y el rango de isótopos radiactivos que eran capaces de abordar presentes en el mercado. Continuando con el siguiente criterio, Aspectos de Riesgo, se propusieron instrumentos que deben ser desarrollados aplicando estos a Confiabilidad Tecnológica, Confiabilidad en el Proveedor y para el caso de Aceptación Pública se propone adaptar algunos existentes.

En relación a la aplicación del modelo, las alternativas que mejor se valoran son CICLO2 y RECH3. El CICLO2 es la mejor porque cuenta con muy pocos impactos ambientales, presenta el mejor VAN e IVAN y presenta menos problemas de riesgo tanto técnicos como de aceptación pública. La segunda alternativa mejor evaluada es el RECH3. Esto se debe a que presenta mejores aspectos de seguridad nuclear y contribuye mejor a la investigación, a la producción de isótopos de gran demanda y posee mejor cobertura sobre el espacio de nuevas líneas de desarrollo contribuyendo así a potenciales transferencias al sector privado. A pesar de esto, la alternativa RECH3, no supera el filtro del VAN Social.

La experiencia de la aplicación de una evaluación multicriterio ha permitido conjugar varios aspectos de índole diferente lo que ha sido muy bien recibido por parte de los expertos en Tecnologías Nucleares y Seguridad Nuclear. Para la experta del Ministerio de Desarrollo Social, le parece también interesante que en instituciones técnicas como la CChEN se realice iniciativas como esta metodología avanzada para la toma de decisiones. Esta experiencia de Tesis ha llevado a la plana ejecutiva a tomar la decisión de mejorar los estudios planteados en este trabajo incorporando otras alternativas y variando las planteadas en esta tesis. Se recomienda profundizar en la medición del impacto en aspectos sociales y la elaboración de instrumentos que permitan medir la opinión de autoridades políticas, ciudadanía, comunidad médica y científica respecto de esta tecnología en sus diferentes variantes.

6. Glosario de siglas

Sigla	Significado
CChEN, CCHEN	: Comisión Chilena de Energía Nuclear
CDF	: Core Damage Frequency
CFF	: Common cause failures
CTBTO	: Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization
DIA	: Declaración de Impacto Ambiental
DOE	: United States Department of the Energy
DS	: Decreto Supremo
EIA	: Evaluación de Impacto Ambiental
ERNC	: Energía Renovables No Convencionales
FN	: Flujo Neto
FNE	: Indicador Flujo de Neutrones Epitérmicos
FNR	: Indicador Flujo Neutrones Rápidos
FNT	: Indicador Futuro de Neutrones Térmicos
GMP	: Buenas Prácticas de Manufactura (good manufacturing practice)
IAEA	: International Atomic Energy Agency
ICRP	: Indicador Cobertura Radioisótopos por Prevención
ICRT	: Indicador Cobertura Radioisótopos por Tratamiento
INPRO	: Methodology for Sustainability Assessment of Nuclear Energy Systems
IOT	: Instrumentos de Ordenamiento Territorial
IOT	: Instrumentos de Orden Territorial
IPR	: Indicador Producción de Radiofármacos
IPT	: Instrumentos de Planificación Territorial
IRIDM	: integrated risk informed decision making
IVAN	: Índice de Valor Actualizado Neto

Sigla	Significado
NCA	: Indicador Número de Personas con Control Dosimétrico
NEA	: Nuclear Energy Agency
NED	: Indicador Nivel de Energía de Deutrones
NEP	: Indicador Nivel de Energía de Protones
NES	: Nuclear energy system
NMLIN _A	: Indicador de Potenciales nuevas líneas de investigación o mejoras significativas a las existentes en Aplicaciones Nucleares
NMLIN _P	: Indicador de Potenciales nuevas líneas de investigación o mejoras significativas a las existentes en Plasma Termonuclear
NNR	: Número de Nuevos radioisótopos no producidos en el mercado Chileno
NCA	: Número de Calibraciones Anuales
NPCD	: Indicador Número de Personas con Control Dosimétrico
OIEA, IAEA	: Organismo Internacional de Energía Atómica
PIM	: Planta de Irradiación Multipropósito
POE	: Personal Ocupacionalmente Expuesto
PSA	: Probabilistic safety assessment
RAT	: Risk Assessment Tool
SSC	: Systems, structures or components
UTAUT	: Teoría Unificada de la Aceptación de la Tecnología
VAN	: Valor Actualizado Neto

7. Bibliografía

- Acelerandolaciencia. (23 de 03 de 2015). *Acelerando la Ciencia*. Recuperado el 2016 de 11 de 27, de <https://acelerandolaciencia.wordpress.com/tag/reactor-nuclear/>
- AES GENER S.A. (2017). *INFORME DE CLASIFICACION*. Santiago: Feller.Rate Clasificadora de Riesgo.
- Alvarado Miranda, V. (01 de 08 de 2012). *mupintulu kimlu*. Recuperado el 27 de 11 de 2016, de http://mupintulukimlu.blogspot.cl/2012_08_01_archive.html
- Arancibia , S., Contreras, E., Mella, S., Torres, P., & Villablanca, I. (2006). <http://www.dii.uchile.cl/~ceges/publicaciones/>. Recuperado el 2016 de 11 de 27, de <http://www.dii.uchile.cl/~ceges/publicaciones/ceges48.pdf>
- Arancibia, S. (2017). Modelación Multicriterio. *Estadística Aplicada y Econometría*. Santiago: Universidad de Chile.
- CChEN. (2011). *Informe de Costos ABC Departamento de Producción y Servicios*. Santiago: CChEN.
- CChEN. (04 de 11 de 2016). *Transparencia CChEN*. Recuperado el 04 de 11 de 2016, de http://www.cchen.cl/transparencia/transparencia_2016/index.html
- CChEN1. (2014). *BALANCE DE GESTIÓN INTEGRAL 2014*. Santiago: CChEN.
- CChEN2. (2011). *Balance Integral de Gestión 2011*. Santiago: CChEN.
- CChEN3. (2017). *Cuenta Pública Participativa 2016*. Santiago: CChEN.
- CChEN5. (3 de Enero de 1985). *REGLAMENTO DE PROTECCIÓN RADIOLOGICA DE INSTALACIONES RADIATIVAS*. CChEN.
- CChEN6. (s.f.). *www.cchen.cl - Aplicaciones Nucleares*. Recuperado el 26 de 06 de 2017, de http://www.cchen.cl/index.php?option=com_content&view=category&id=298&Itemid=101
- Chain, Y., & Illanes, L. (2015). *Radiofármacos en medicina nuclear*. Buenos Aires: Universidad Nacional de la Plata.
- Contreras, E. (2004). *Evaluación social de inversiones públicas: enfoques alternativos y su aplicabilidad para Latinoamérica*. Santiago: CEPAL.
- Cordero Chaves, S. (2012 de 02 de 02). *wordpress*. Recuperado el 2016 de 11 de 27, de <https://grupo3modulo2.wordpress.com/tag/pet-tomografia-por-emision-de-positrones/>
- Deloitte. (2016). *Sector Energía III: ERNC, perspectivas y dificultades. Chile*. Santiago: Deloitte.
- energia-nuclear.net. (11 de 11 de 2016). *energia-nuclear.net*. Recuperado el 27 de 11 de 2016, de <http://energia-nuclear.net/aplicaciones>
- Fernández, D. C. (2012). *Medicina Nuclear*. Recuperado el 04 de 11 de 2016, de http://www.medicinanuclear.cl/pet_indice-2.htm
- GEAB. (15 de 10 de 2016). *After Fukushima*. Recuperado el 17 de 04 de 2017, de <http://geab.eu/es/>: <http://geab.eu/es/?s=after+fukushima>
- Geels, F. (2011). Cultural legitimacy and framing struggles in innovation journeys: A cultural-performative perspective and a case study of Dutch nuclear energy (1945–1986). *Technological Forecasting & Social Change*, 910-930.

- Hassan Abou Yehia, I. (03 de 2010). *www-ns.iaea.org*. Recuperado el 10 de 04 de 2017, de https://www-ns.iaea.org/downloads/ni/training/safety_standards_presentations/IAEA%20Safety%20Standards%20for%20Research%20Reactors.pdf
- Hernández, C. (2003). Mediciones de Flujo Neutrónico en un núcleo configurado por elementos de bajo enriquecimiento. *Nucleotécnica*.
- IAEA1. (2009). *Classification of Radioactive Waste*. Vienna: IAEA.
- IAEA10 - INSAG-25. (2011). *A Framework for an Integrated Risk Informed Decision Making Process*. Viena: IAEA.
- IAEA2 Nuclear Energy Series. (2014). *INPRO Methodology for Sustainability Assessment of Nuclear Energy Systems: Infrastructure*. Viena: IAEA NUCLEAR ENERGY SERIES PUBLICATIONS.
- IAEA3 Nuclear Energy Series. (2015). *Milestones in the Development of a National Infrastructure for Nuclear Power*. VIENNA: International Atomic Energy Agency.
- IAEA4. (17 de 11 de 2016). *Organismo Internacional de Energía Atómica*. Recuperado el 10 de 04 de 2017, de <http://www-ns.iaea.org/tech-areas/emergency/ines.asp#3>
- IAEA5. (2016). *Research Reactor: Purpose and Future*. Viena: IAEA.
- IAEA6. (2016). *Safety of Research Reactor*. VIENNA: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY.
- IAEA7. (2011). *Selection and Use of Performance Indicator in Decommissioning*. Vienna: IAEA Nuclear Energy Series.
- IAEA8. (27 de 11 de 2016). *IAEA*. Recuperado el 27 de 11 de 2016, de <https://www.iaea.org/>
- Kamyab, M. N. (2010). Evaluating the Core Damage Frequency of a TRIGA Research Reactor Using Risk Assessment Tool Software. *IMECS*.
- Laili, Z. (2010). CHARACTERISATION OF SPENT ION EXCHANGE RESINS FROM PUSPATI TRIGA REACTOR. *Seminar R&D 2010, 12-15 October, 2010, Malaysian Nuclear Agency, Bangi, Selangor*. Bangi: Malaysian Nuclear Agency.
- Madera, M. (2012). Estudio de traducción y confiabilidad del instrumento de la Teoría Unificada de la Aceptación y Uso de la Tecnología (UTAUT). *Revista de innovación educativa*.
- Martí-Climent, J. (1999). Utilización de un ciclotrón para la producción de radionucleidos emisores de positrones. *Utilización de un ciclotrón para la producción de radionucleidos emisores de positrones*, Volumen 8 Num 4.
- MATA HURIBE, E., & MARÍN HERNÁNDEZ, J. A. (2016). Exámenes de laboratorio.
- MIN.DESARROLLO, M. y. (2016 de 10 de 10). *Sistema Nacional de Inversiones*. Recuperado el 2015 de 12 de 22, de <http://sni.ministeriodesarrollosocial.gob.cl/download/oficio-conjunto-n3406-22-12-2015/?wpdmdl=842>
- Ministerio de Salud de Chile. (2009). *Informe de demanda de Resultados: Demanda de cada uno de los PS y sus respectivos GPP*. Santiago: Ministerio de Salud de Chile.
- Moreno Jimenez, J. M. (1989). El proceso de toma de decisiones en el contexto económico-empresarial. Modelo aeiou. *Cuadernos de bioestadística y sus aplicaciones informáticas*, 31-40.
- NUCLEAR ENERGY AGENCY. (2010). *Public Attitudes to Nuclear Power*. OECD/NEA.

- Nuclear, C. C. (01 de 01 de 2016). *Comisión Chilena de Energía Nuclear*. Recuperado el 01 de 11 de 2016, de <http://www.cchen.cl>
- OIEA. (2015). *Perfil Estratégico Regional para América Latina y el Caribe (PER) 2016 – 2021*. Viena, Austria: Organismo Internacional de Energía Atómica.
- Oliverio, G. (2007). Optimización integral del mantenimiento: hacia la Terotecnología de clase mundial. *Clepsidra*, Vol. 3, Núm. 4 (2007).
- PACHECO, J. F., & CONTRERAS, E. (2008). Métodos de Evaluación Multicriterio. En J. F. PACHECO, & E. CONTRERAS, *Métodos de Evaluación Multicriterio* (págs. 49-56). Santiago de Chile: Naciones Unidas.
- Saaty, T. (1997). *Toma de decisiones para líderes*. Rws Publications.
- SAATY, T. (2000). *Fundamentals of Decision Making and Priority Theory with the Analytic Hierarchy Process*. Pittsburgh, U.S.A.: RWS Publications.
- Servicio de Evaluación Ambiental. (2012). *Guía para la evaluación de impacto ambiental de centrales de generación de energía eléctrica con biomasa y biogás*. Santiago: Servicio de Evaluación Ambiental.
- Servicio de Evaluación de Impacto Ambiental. (2013). *Guía para la descripción del Territorio en SEIA*. Santiago: Servicio de Evaluación Ambiental.
- Seungkook, R. (2017). Big Data Analysis of Public Acceptance of Nuclear Power in Korea. *Nuclear Engineering and Technology*, N°4 9 850 - 854.
- SNI. (27 de 11 de 2016). *SNI*. Recuperado el 27 de 11 de 2016, de <http://sni.ministeriodesarrollosocial.gob.cl/>
- Technical Secretariat Division REPSOL. (13 de 11 de 2015). www.repsol.com. Recuperado el 2016 de 11 de 27, de www.repsol.com: https://www.repsol.com/es_es/corporacion/conocer-repsol/contexto-energetico/matriz-energetica-mundial/
- Venkatesh, V., Morris, M., Davis, G., & Davis, F. (2003). User Acceptance of Information Technology: Toward a Unified View. *MIS Quarterly*, 425-478.

Anexo 1 - Productos CCHEN

- Venta de Radioisótopos y Radiofármacos
 - Radioisótopos del Reactor
 - Ioduro de sodio con Portador y Reductor
 - Pertecneciato de Sodio
 - Cloruro de Rubidio
 - Ácido Ortofosfórico con Portador
 - Cloruro de Sodio
 - Ioduro de Sodio libre de portador
 - Ácido Ortofosfórico
 - Cloruro de Potasio
 - Cloruro de Samario
 - Sulfato de Cobre
 - Iridio
 - Radioisótopos del Ciclotrón
 - Solución de Flúor Deoxiglucosa
 - Solución de Fluoruro de Sodio
 - Juego de Reactivos
 - MIBI (Metoxiisobutilisonitrilo Complejo catiónico de Cobre)
 - Ácido dimercaptosuccínico V
 - Solución de ácido dietilentriaminopentacético
 - MAG-3 (S-Benzoil-mercaptoacetilglicina)
 - Solución de etilendiaminotetrametilendifosfonato
 - Solución de metaiodobenzilguanidina
- Servicios de Irradiación Gama
 - Irradiación Gamma en Planta de Irradiación Multipropósito
 - Irradiación Gamma Experimental
 - Irradiación en Reactor RECH-1
- Servicios de Protección Radiológica
 - Dosimetría Personal
 - Metrología de Radiaciones Ionizantes
 - Gestión de Desechos Radiactivos
 - Cursos de Protección Radiológica
 - Curso Básico de Protección Radiológica, CUBEPRO 2016
 - Cursos de Protección Radiológica Cerrados
 - Curso de Elementos De Protección Radiológica Operacional, CEPRO, PARA LA INDUSTRIA 2016
 - Curso de Elementos de Protección Radiológica Operacional, CEPRO, PARA LA SALUD 2016
 - Radiomedicina
 - Servicio de control y vigilancia médica de trabajadores ocupacionalmente expuestos a radiaciones ionizantes, en condiciones normales de operación y en caso de incidentes o accidentes.

- Certificación Radiológica
 - Certificación y control de calidad radiológica de alimentos de alto consumo de la población nacional y certificación radiológica de productos de exportación e importación. Además se ofrece análisis y certificación de calidad radiológica en combustibles, chatarras y productos similares
- Protección Radiológica Operacional
 - Frotis para detectar posibles fugas en equipos con fuentes selladas
 - Levantamientos radiológicos
 - Cálculo de blindajes
 - Chequeo de chatarra por contaminación con isótopos naturales, revisión de NORMS
- Servicios Analíticos
 - Análisis de Isótopos Ambientales
 - Metrología Química
 - Análisis Químico Elemental
- Metalurgia nuclear y materiales de uso en ingeniería
 - Aplicación y Desarrollo de Técnicas de Ensayos no Destructivos
 - Mecanizado de Piezas
 - Servicios de Fusión de Aleaciones Especiales
 - Servicios en Metrología y Control Dimensional
 - Servicios en Tratamientos Térmicos y Termomecánicos
 - Análisis de Oxígeno y Nitrógeno
 - Servicios en Metalurgia de Polvos y Materiales Avanzados

Anexo 2 – Resultados Relevantes CChEN 2014

A continuación muestran algunos hechos del 2014 que permiten ver las complejas interacciones del sector nuclear entre los diferentes actores que se relacionan con la CChEN.

- En seguridad nuclear se pueden mencionar
 - En el área de la regulación se destaca la actualización del marco normativo de la protección física de fuentes radiactivas y gammagrafía industrial; ciclotrones para producción de radiofármacos, radiografía industrial y braquiterapia por carga manual diferida. Asimismo, se llevó a efecto las visitas de fiscalización, realizadas a 251 instituciones con instalaciones radiactivas de primera categoría. Fueron efectuadas evaluaciones de seguridad para nuevas aplicaciones tecnológicas, tales como: la radioterapia intraoperatoria con haz de electrones, la radiocirugía con aplicaciones gamma y aceleradores lineales de electrones.
 - 20 instalaciones radiactivas del país solicitaron a la CChEN la gestión de sus desechos. El volumen total de desechos radiactivos tratados y almacenados fue de 12,14 m³.
 - Se llevaron a cabo 87 análisis radiológicos a productos de exportación, que respaldan más de 2.000 toneladas de productos, tales como: mantequilla, leche en polvo, queso, manzanas y carne de pavo.

- En protección radiológica
 - Se realizaron 52 análisis radiológicos en fuentes de braquiterapia utilizadas para tratamiento de cáncer y 10 análisis radiológicos en equipos de gammagrafía industrial y en densímetros nucleares usados en la industria.
 - Radiomedicina de la CChEN realizó 180 análisis a personal externo ocupacionalmente expuesto, es decir, personas que trabajan con fuentes o equipos emisores de radiaciones ionizantes.
 - Servicios de calibración y estandarización de equipos de entidades externas que contienen fuentes radiactivas, atendió 199 solicitudes de calibración.
 - Instalación de 3 estaciones para el monitoreo radiológico en tiempo real en dependencias de la Dirección General de Aeronáutica Civil, en la Estación Quinta Normal en Santiago, el Aeropuerto de Chacalluta en Arica y el Aeropuerto Diego Aracena en Iquique, iniciando así la recuperación de la Red Nacional de Radiactividad Ambiental.
 - Se dictaron 16 cursos de protección radiológica a 323 alumnos.

- En producción
 - Producción de tecnecio 99 y yodo 131, se contribuyó a la atención, en el ámbito de la medicina nuclear, a más de 40.000 pacientes de cáncer y otras patologías, tanto para procedimientos de diagnóstico como de terapia. Se produce y abastece de flúor 18, un radiofármaco utilizado para la detección de diversos tipos de cáncer en su etapa inicial entregado a diversos hospitales y clínicas 2.497 dosis para el diagnóstico de la enfermedad en sus diversas manifestaciones.
 - Control dosimétrico controla a 7.700 usuarios anuales expuestos a radiaciones ionizantes.
 - La Planta de Irradiación Multipropósito (PIM) de la CCHEN, operó 8.560 horas al año, lo cual permitió atender los requerimientos de 110 empresas nacionales que atienden tanto el mercado local como el de exportación, siendo las industrias de alimentos, de materias primas y de materiales médico quirúrgicos, los principales demandantes de los servicios. Se procesaron 2.021 toneladas de alimentos, 165 toneladas de materias primas y 729 metros cúbicos (13.853 cajas) de material médico quirúrgico.

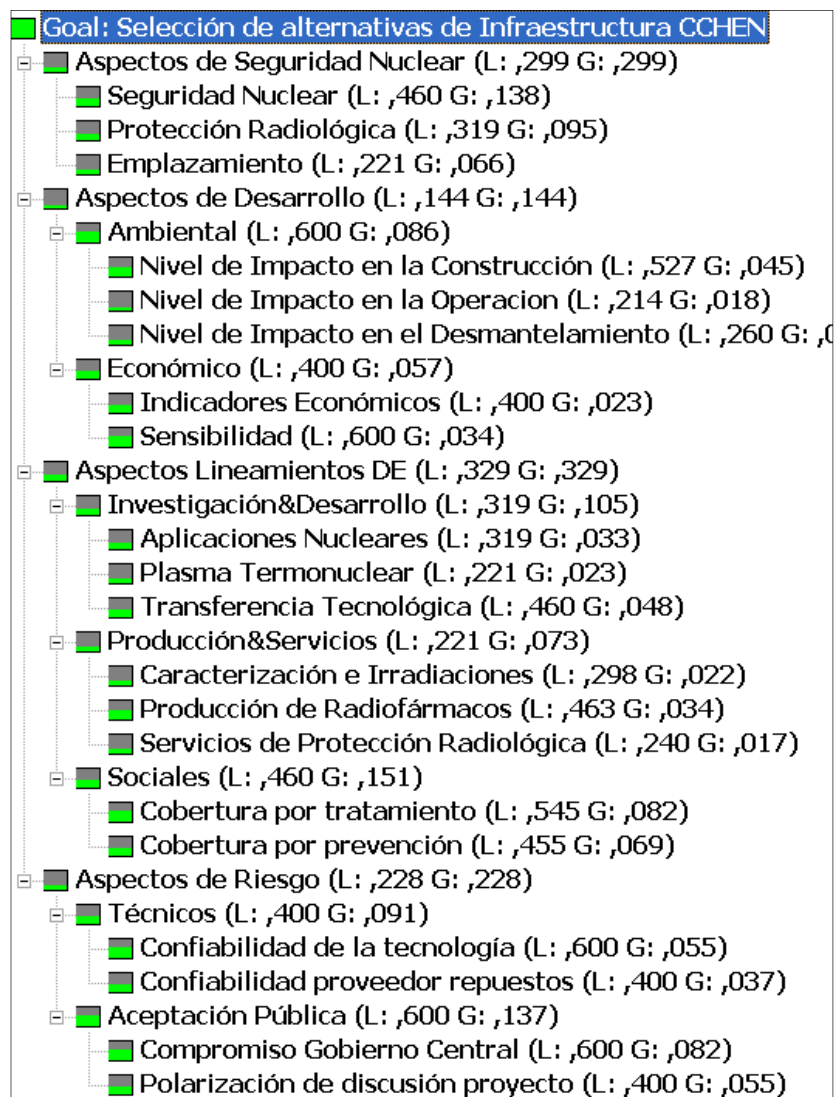
- En el área de la investigación destaca
 - Estudios de isótopos ambientales contribuyendo, anualmente, al registro mundial de medición de isótopos estables en precipitaciones (base de datos disponibles para estudios en hidrología, geología, medioambiente y variabilidad climática y otras áreas). Esta técnica permite realizar investigación en evolución de acuíferos; caracterizaciones isotópicas e hidroquímicas de aguas de ríos para su uso en agricultura o para el consumo humano; nutrición; nanopartículas para la detección temprana del Alzheimer; indicadores de exposición laboral y salud ambiental de la población; y aplicaciones de técnicas nucleares en análisis forense.
 - En agricultura se puede mencionar estudios de los efectos del uso de plaguicidas en los ecosistemas, así como la participación en proyectos para la mejora de sistemas agrícolas de producción, cuya finalidad es disminuir la aplicación de fertilizantes nitrogenados.
 - Se realiza investigación avanzada en plasma termonuclear con una importante participación investigadores de la Universidad Católica de Chile.
 - Se sumaron estudios y actividades de aplicación como el desarrollo de un arreglo experimental para el estudio de efectos de irradiaciones pulsadas en tejido biológico.
 - Se realizó un trabajo de validación de controles de calidad críticos de radioisótopos y radiofármacos. En lo específico, se trabajó en la validación de esterilidad y endotoxinas.
 - En el ámbito de la Producción y Servicios se sintetizó Flúor estradiol (18F-FES), el cual es un nuevo producto para el diagnóstico de cáncer de mama.

- Se fabricaron tres elementos combustibles adicionales, en base a siliciuro de uranio de bajo enriquecimiento, para el reactor de investigación RECH-1 situado en el Centro de Estudios Nucleares de La Reina.
- Se desarrolló el proyecto de desarrollo de combustible de alta densidad fabricando las miniplacas UMo LEU bajo especificaciones para irradiación.

Anexo 3 – AHP Anexos

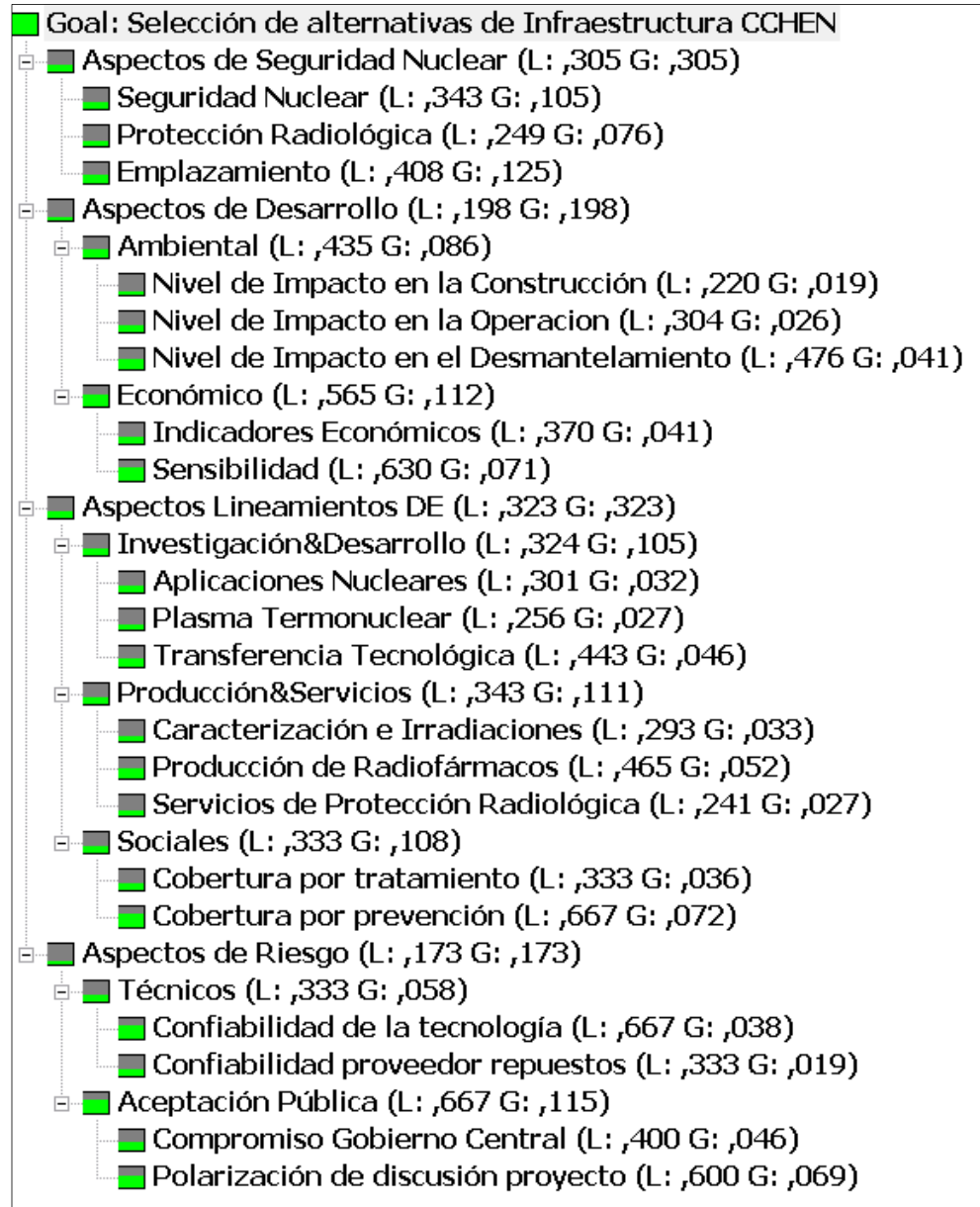
Se realiza de acuerdo a los juicios expertos en relación a los criterios y los elementos.

Figura 28: Árbol Jerárquico de Criterios – Visión Experto Seguridad Nuclear



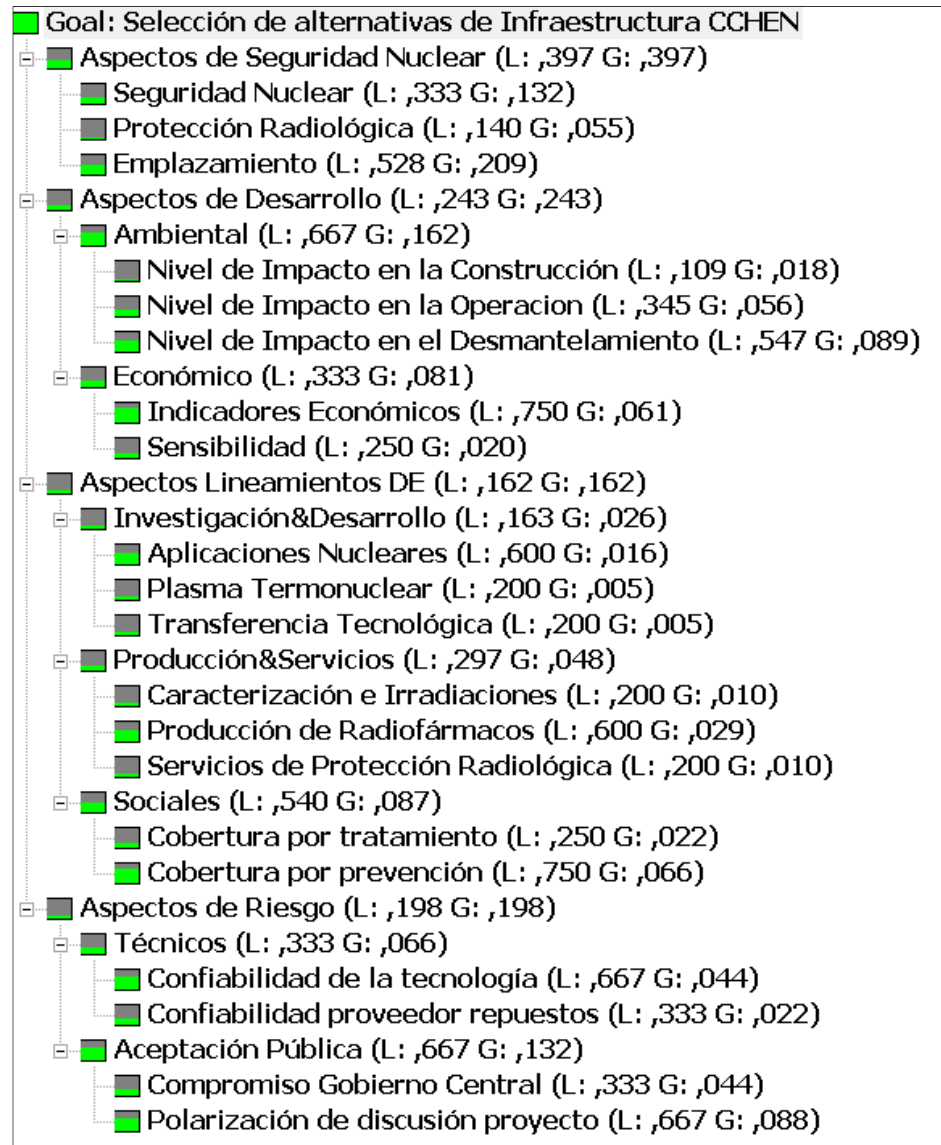
Fuente: Elaboración propia

Figura 29: Árbol Jerárquico de Criterios – Visión Experto Tecnología Nuclear



Fuente: Elaboración propia

Figura 30: Árbol Jerárquico de Criterios – Visión Experto Aspectos Sociales



Fuente: Elaboración propia