

# TABLA DE CONTENIDO

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

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

## 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 <sub>A</sub> .....	76
Gráfico 19: Escala Normalizada del Indicador NMLI <sub>p</sub> .....	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