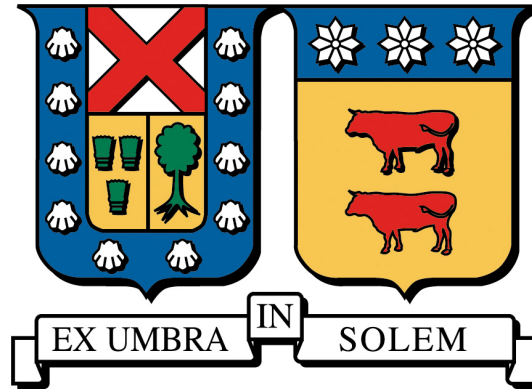


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA  
DEPARTAMENTO DE INDUSTRIAS  
SANTIAGO- CHILE



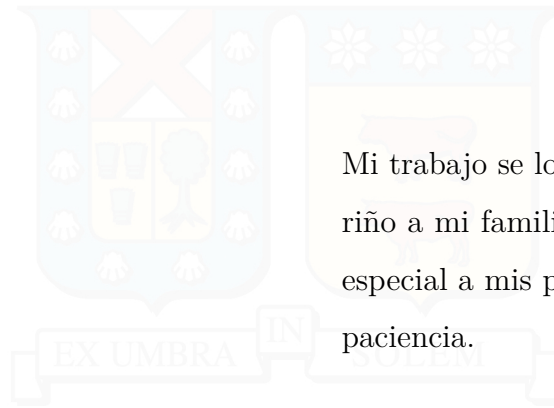
**GENERACIÓN DE UNA BASE ENERGÉTICA  
SUSTANTABLE PARA REEMPLAZO DE CENTRALES  
TÉRMICAS EN ZONAS DE ALTA CONTAMINACIÓN**

**NÉSTOR SEBASTIÁN RIVERA AVENDAÑO**

TESIS PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL INDUSTRIAL

PROFESOR GUÍA : PILAR GARATE CHATEAU  
PROFESOR CORREFERENTE : HUGO OSORIO ZELADA

JULIO 2017



Mi trabajo se lo dedico con mucho cariño a mi familia y a mis amigos. En especial a mis padres, por su apoyo y paciencia.

---

## RESUMEN EJECUTIVO

El siguiente trabajo tiene como objetivo generar una guía para la evaluación de proyectos de generación de energía en zonas altamente contaminadas del país, analizándose todas las zonas del país declaradas como zonas saturadas, latentes o de sacrificio. El análisis consiste en la búsqueda de una relación entre la generación energética con métodos con alto impacto para el medio ambiente como lo son las centrales térmicas, principalmente las de carbón, y la contaminación ambiental presente.

Para evaluar esta relación se utilizará el mapa energético dispuesto por la Comisión Nacional de Energía la cual entrega la ubicación y las principales características de todas las centrales de nuestro país, independiente de su combustible de generación y su tamaño. Posteriormente y luego de obtenida la relación para alguna de las zonas, se utilizará el mismo mapa para evaluar el potencial energético de las zonas que presenten altas tasas de generación mediante energías térmicas. Según los resultados obtenidos se escogerá la ubicación con mayor potencial de instalación en cuanto al recurso solar y eólico.

Luego de realizados los estudios se ha seleccionado la zona de Mejillones debido a que en esta localidad existe la posibilidad de evaluar una central de generación mediante todos los tipos de energía propuestos (Solar Fotovoltaica, Solar de Concentración, Eólico OnShore y Eólico Off Shore). Con los datos obtenidos a través de los exploradores de recursos de la Universidad de Chile, en conjunto con el software NREL-SAM, se evaluará la posibilidad de generar una base de generación renovable que permita reemplazar en parte la generación de energía que actualmente es entregada mediante las centrales térmicas a carbón. Para esto se utilizará un modelo de programación lineal que considera la generación horaria de cada una de las centrales a una escala básica de 1 MW de capacidad instalada, con esto se escoge la mejor combinación de recursos para entregar una base de generación estable en el tiempo y que permita reemplazar el mayor potencial de generación fijo durante las 24 horas del día y los 365 días del año.

---

Posteriormente a la evaluación de los recursos y obtener obtención de las configuraciones óptimas, se realiza una evaluación económica de cada una de las alternativas obtenidas mediante el modelo de optimización planteado y, considerando una serie de criterios aparte del económico se escoge la mejor alternativa para la zona a evaluar. Adicionalmente se lleva a cabo evaluación Multi-Criterio que compara la solución propuesta que incluye los 4 tipos de centrales con posibilidad de ser instaladas en la zona con el actual método de generación, es decir las centrales térmicas a carbón. La evaluación considera en diversos criterios los cuales están clasificados en Sociales, Ambientales y Económicos. Para la obtención de la importancia de cada uno de los criterios se ha evaluado en conjunto con expertos en el área, la relación de importancia de cada uno de los criterios y sub-criterios. Como resultado de esta evaluación se tiene que la base de generación sustentable propuesta presenta los mejores resultados de la evaluación, los cuales sumados a los favorables indicadores económicos se considera como la mejor opción para reemplazar en parte la generación térmica a carbón de la zona de Mejillones.

**Palabras Clave:** ERNC, Zonas de Sacrificio, Multi-Criterio, Optimización.

---

## ABSTRACT

The following work's objective is to establish the foundations for future evaluations of energy generation projects in highly contaminated areas of the country, analyzing every area that's declared a saturated, potential and sacrificed zone.

The analysis seeks to assess the correlation between the high impact of energy generation methods on the environment such as thermal plants based on coal and the current environmental contamination.

To review this relationship, we'll use an energy map provided by the National Energy Commission which shows the locations and main characteristics of all energy productive plants of our country, regardless of its fuel generation and size.

After obtaining the relation for some of the areas, the same map will be used to calculate the thermal energy potential of areas with high generation rates. Depending on the study results, the area with the best solar and wind energy generation capacity will be chosen for implementation. After the studies, the selected zone is Mejillones given that in this area there is a chance to evaluate a generation plant with every energy type proposed (solar photovoltaic, solar concentration, on and off shore wind). With the data obtained through the resources provided by Universidad de Chile, together with NREL-SAM software, the possibility of creating a base for renewable generation that allows replacing some of the energy generation that is already given by coal thermal plants will be evaluated.

To accomplish this, we'll use a linear programming model that considers the time generation of every plant in a basic scale of 1 MW of installed capacity, from this results the best combination of resources will be chosen to give a base of generation that is stable in time and that allows to replace the biggest generation of fixed potential for 24 hours a day and 365 days of the year.

Subsequently to the evaluation of the resources and obtaining the optimal configurations, an economic evaluation will be done to every alternative obtained through the model proposed and the best alternative is chosen for evaluation considering a series of additional criteria.

---

Additionally, a Multi-Criteria evaluation is done to compare the proposed solution that includes 4 type of plants with a possibility of being installed on the zone with the given generation method, that is to say the coal thermal plants.

The evaluation considers various criteria which are classified in Social, Environmental and Economic. The relation of importance of every criteria and sub-criteria is evaluated with experts to obtain the importance of every one of them. As a result, the proposed foundation of sustainable generation presents the best results of the evaluation, which in addition to the favorable economic indicators, it's considered as the best option to replace some of the thermal coal generation on Mejillones.

Key Words: ERNC, Saturated Zones, Pollution, Heavy Metals.

# Índice de Contenidos

<b>1. Presentación del tema</b>	<b>1</b>
1.1. Problemática	1
1.1.1. Tema a Desarrollar	2
1.2. Objetivos	3
1.2.1. Objetivo General	3
1.2.2. Objetivos Específicos	3
<b>2. Marco Teórico</b>	<b>5</b>
2.1. Contexto Energético Nacional	5
2.1.1. Matriz Energética Nacional	5
2.1.2. Tendencias en Fuentes Energéticas	8
2.1.3. ERNC En Chile	10
2.2. Potencial ERNC en Chile	17
2.2.1. Potencial Energía Eólica	17
2.2.2. Potencial Solar PV	20
2.2.3. Potencial Solar CSP	21
2.3. Mercado Eléctrico Nacional	23
2.3.1. Marco Institucional	23
2.3.2. Agentes del Mercado	24
2.4. Contaminación ambiental en Chile	33
2.4.1. Contaminación del aire	33
2.4.2. Emisiones generadas por centrales termoeléctricas	36
2.4.3. Efectos de los contaminantes	39
2.4.4. Zonas Saturadas En Chile	42
2.5. Tecnología de Concentración Solar	50
2.5.1. Centrales de Receptor Central	51
2.6. Tecnología Eólica	59
2.6.1. El Viento	59
2.6.2. Cimentaciones	61
2.6.3. Aerogeneradores	63
2.7. Tecnología Fotovoltaica	67
2.7.1. Elementos que Constituyen una Instalación	67
2.7.2. Tipos de Módulos Fotovoltaicos	69
2.8. Costos de las ERNC	71
2.8.1. Costos Parque Eólicos	71

2.8.2.	Energía Solar Fotovoltaica . . . . .	72
2.8.3.	Costos Centrales de Potencia Solar . . . . .	74
2.9.	Evaluación Multicriterio . . . . .	75
2.9.1.	Clasificación Técnicas Multicriterio . . . . .	79
2.9.2.	Proceso Para la Evaluación Multicriterio . . . . .	80
<b>3.</b>	<b>Metodología</b>	<b>89</b>
3.1.	Análisis de Zonas Saturadas . . . . .	89
3.1.1.	Análisis de las características de la zona . . . . .	89
3.1.2.	Análisis de disponibilidad de recursos . . . . .	89
3.1.3.	Análisis de Factibilidad Técnica . . . . .	90
3.2.	Optimización de los Recursos . . . . .	91
3.2.1.	Consideraciones del Modelo . . . . .	92
3.2.2.	Inputs del Modelo . . . . .	92
3.2.3.	Modelo de Programación Lineal Entera . . . . .	93
3.2.4.	Función Objetivo . . . . .	95
3.3.	Evaluación Económica . . . . .	96
3.4.	Evaluación Social Costo-Beneficio . . . . .	102
3.4.1.	Cuantificación de Beneficios de Nuevos Empleos . . . . .	102
3.4.2.	Precios Sociales . . . . .	102
3.5.	Evaluación Multicriterio . . . . .	103
3.5.1.	Objetivo de la Evaluación . . . . .	104
3.5.2.	Actores Involucrados . . . . .	104
3.5.3.	Alternativas de Proyectos . . . . .	104
3.5.4.	Selección de Criterios . . . . .	104
3.5.5.	Criterios Sociales . . . . .	104
3.5.6.	Criterios Ambientales . . . . .	110
3.5.7.	Criterios Económicos . . . . .	111
<b>4.</b>	<b>Análisis de Resultados</b>	<b>113</b>
4.1.	Análisis de Zonas Saturadas . . . . .	113
4.1.1.	Elección Zonas Saturadas a Evaluar Según sus Recursos . . . . .	114
4.1.2.	Análisis de Capacidad de Generación Actual . . . . .	116
4.1.3.	Análisis de recursos . . . . .	121
4.2.	Implementación de Guía para la Evaluación de Centrales de Generación en Zonas de Alta Contaminación . . . . .	121
4.2.1.	Características de la Zona . . . . .	121
4.2.2.	Disponibilidad de Recursos . . . . .	123
4.2.3.	Análisis de Disponibilidad Técnica . . . . .	124
4.2.4.	Zona de Evaluación de Centrales . . . . .	125
4.2.5.	Tamaño de las centrales . . . . .	129
4.3.	Evaluación Económica: . . . . .	131
4.3.1.	Central Eólica Onshore . . . . .	131
4.3.2.	Central Eólica Offshore . . . . .	133
4.3.3.	Central Fotovoltaica . . . . .	134

4.3.4. Central CSP . . . . .	134
4.4. Selección de Alternativa . . . . .	137
4.5. Gráficos de Generación . . . . .	138
4.6. Evaluación Social Costo-Beneficio . . . . .	142
4.6.1. Beneficio por Generación de Nuevos Empleos . . . . .	142
4.6.2. Van Social . . . . .	142
4.7. Evaluación Multi-criterio . . . . .	143
4.7.1. Resultados Sociales . . . . .	143
4.7.2. Resultados Ambientales . . . . .	146
4.7.3. Resultados Económicos . . . . .	147
4.7.4. Resumen de Resultados . . . . .	149
<b>5. Conclusiones generales.</b>	<b>153</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>155</b>

# Índice de Tablas

2.1. Estado de proyectos ERNC en Chile . . . . .	10
2.2. Estado Proyectos Energía Solar Fotovoltaica en [MW] . . . . .	13
2.3. Participación de la Energía Fotovoltaica en cada una de las Fases con Respecto a las ERNC . . . . .	13
2.4. Estado Proyectos Energía Eólica en [MW] . . . . .	14
2.5. Participación de la Energía Eólica en cada una de las fases con respecto a las ERNC . . . . .	15
2.6. Estado Proyectos Energía Solar CSP en [MW] . . . . .	15
2.7. Participación de la Energía Solar CSP en Cada una de las Fases con Respecto a las ERNC . . . . .	16
2.8. Restricciones Aplicadas al Potencial Eólico . . . . .	18
2.9. Potencial Eólico por Región . . . . .	19
2.10. Restricciones Aplicadas al Potencial Solar Fotovoltaico . . . . .	20
2.11. Potencial Solar Fotovoltaico por Región . . . . .	21
2.12. Restricciones Aplicadas al Potencial Solar . . . . .	22
2.13. Potencial Solar CSP por Región . . . . .	22
2.14. Normas Primarias de calidad vigentes . . . . .	35
2.15. Factores de emisión de CO2 equivalente por combustible para generación de energía . . . . .	39
2.16. Factores de emisión por combustible y gas para generación de energía . . . . .	40
2.17. Zonas Saturadas o Latentes en la zona norte . . . . .	44
2.18. Zonas Saturadas o Latentes en la zona central . . . . .	45
2.19. Zonas Saturadas o Latentes en la zona sur . . . . .	46
2.20. Concentración de Metales Pesados en la Zona . . . . .	49
2.21. Evolución de los Costos de Instalación y Generación Energía Eólica . . . . .	72
2.22. Participación de Costo Según Tecnología . . . . .	72
2.23. Evolución de Costos de Instalación y Operación para Centrales PV . . . . .	73
2.24. Evolución de Costos de Instalación y Operación para Centrales de Potencia Solar . . . . .	74
2.25. Costos Actuales de Centrales de Potencia Solar Según Capacidad de Almacenamiento y HTF . . . . .	75
3.1. Atributos Generales para la Evaluación de Centrales . . . . .	96
3.2. Tipo de Financiamiento Seleccionado . . . . .	97
3.3. Nivel de inversión y costos de funcionamiento . . . . .	99

3.4. Costos de Funcionamiento Central CSP . . . . .	99
3.5. Costos de Inversión y Operación . . . . .	100
3.6. Costos de Inversión y Operación . . . . .	101
3.7. Datos Relevantes para la Evaluación de la Central Eólica . . . . .	101
3.8. Factor de corrección para mano de obra . . . . .	102
3.9. Sub-Criterios a Evaluar . . . . .	103
3.10. Área de contacto dermal. . . . .	106
3.11. Coeficiente de Permeabilidad $K_p$ ( $cm/hr$ ) . . . . .	107
4.1. Centrales Térmicas asociadas a Zonas Saturadas en la Zona Norte . .	113
4.2. Centrales Térmicas asociadas a Zonas Saturadas en la Zona Centro .	114
4.3. Centrales Térmicas asociadas a Zonas Saturadas en la Zona Sur . . .	115
4.4. Centrales de Generación Térmica en Tocopilla . . . . .	116
4.5. Centrales de Generación Térmica en Mejillones . . . . .	117
4.6. Centrales de Generación Térmica en Huasco . . . . .	118
4.7. Centrales de Generación Térmica en Concón, Puchuncaví y Quinteros	119
4.8. Centrales de Generación Térmica en la Zona del Gran Concepción . .	120
4.9. Disponibilidad de Recurso en Zonas de Alta Contaminación . . . . .	121
4.10. Concentración de Metales Pesados en la Zona . . . . .	123
4.11. Distribución Óptima de Capacidad Instalada Según Requerimientos de Generación . . . . .	129
4.12. Evaluación de Modelos de Aerogeneradores para Distintas Alturas con Respecto a su Potencial de Generación Promedio Anual en KW. . . . .	131
4.13. Potencial de Generación Mensual Promedio en KW . . . . .	132
4.14. Datos técnicos instalación central eólica onshore . . . . .	132
4.15. Nivel de inversión necesaria instalación central eólica onshore . . . . .	132
4.16. Datos técnicos simulación eólica offshore . . . . .	133
4.17. Niveles Inversión Central Eólica Offshore . . . . .	133
4.18. Datos técnicos de la simulación fotovoltaica . . . . .	134
4.19. Nivel de Inversión en Central Fotovoltaica . . . . .	135
4.20. Datos Técnicos Evaluación de Central CSP . . . . .	135
4.21. Nivel de Inversión en Central CSP . . . . .	136
4.22. Resultados Evaluación Económica . . . . .	136
4.23. Resultados económicos . . . . .	137
4.24. Número de Empleos en Industria Energética Estadounidense . . . . .	142
4.25. Beneficios Por Creación de Nuevos Empleos . . . . .	142
4.26. Resultados Evaluación Social Centrales . . . . .	143
4.27. Riesgo No Cancerígeno Medido Según el Rango Etario por Ingesta de Alimentos . . . . .	144
4.28. Riesgo No Cancerígeno Medido Según el Rango Etario para Contacto Dermal . . . . .	144
4.29. Evaluación de Riesgo Cancerígeno por Ingesta de Alimentos para Concentración de Arsénico . . . . .	144
4.30. Creación de Empleos para Distintos Tipos de Centrales de Generación	146
4.31. Tasa de Compensación para Distintos Tipos de Centrales de Generación	148

4.32. Ponderaciones Locales y Globales para los Sub-Criterios . . . . . 151  
4.33. Calificaciones Finales . . . . . 152



# Índice de Figuras

2.1. Matriz Energética Primaria . . . . .	5
2.2. Matriz Energética Secundaria . . . . .	6
2.3. Fuentes de Generación de Energía en Chile . . . . .	6
2.4. Matriz Energética SIC y SING . . . . .	7
2.5. Costos Proyectados Distintos Tipos de Energía . . . . .	8
2.6. Relación entre el Aumento del PIB y el Consumo Energético . . . . .	9
2.7. Participación ERNC en Matriz Energética . . . . .	11
2.8. Proyecto ERNC en construcción . . . . .	11
2.9. Distribución de Centrales de Generación Solar Fotovoltaica . . . . .	14
2.10. Distribución de Centrales de Generación Eólica . . . . .	14
2.11. Esquema de evaluación para el potencial de ERNC . . . . .	17
2.12. Estructura del Mercado Eléctrico Nacional . . . . .	24
2.13. Clasificación de medios de generación renovables no convencionales. . . . .	26
2.14. Clasificación del sistema de transmisión. . . . .	29
2.15. Costos generación para los Sistemas Interconectados . . . . .	32
2.16. Efectos de los contaminantes . . . . .	33
2.17. Emisión de GEI por tipo de Tecnología . . . . .	36
2.18. Emisiones centrales termoeléctricas por unidad de energía generada en el tiempo – SIC y SING . . . . .	37
2.19. Producción de contaminantes en centrales termoeléctricas Mton/año en una central de 1.000 MW . . . . .	39
2.20. Efectos sobre la salud frente a la exposición al MP en largo plazo . . . . .	40
2.21. Efectos sobre la salud frente a la exposición al MP en corto plazo . . . . .	41
2.22. Mapa de Mejillones y ubicación de sus centrales térmicas . . . . .	48
2.23. Mapa de Mejillones y ubicación de sus industrias . . . . .	48
2.24. Mapa de Mejillones y ubicación de sus centrales térmicas . . . . .	50
2.25. Precio en dólares de heliostatos de 150 m <sup>2</sup> como función del volumen de producción anual. . . . .	52
2.26. Ejes de movimiento de los heliostatos y mecanismo de seguimiento solar. . . . .	53
2.27. Funcionamiento de una planta con almacenamiento e hibridación. . . . .	57
2.28. Potencia y profundidad recomendada para cada cimentación . . . . .	63
2.29. Cimentaciones instaladas según tipo tecnología, hasta el 2014 . . . . .	64
2.30. Soporte utilizado en aerogeneradores onshore . . . . .	64

2.31. Variación del coeficiente de potencia ( $C_p$ ) frente a la velocidad específica $\lambda$ para distintos tipos de aerogeneradores . . . . .	66
2.32. Evolución de Costos de Instalación de Centrales Onshore para Distintos Países . . . . .	73
2.33. Costo de Operación y Mantenimiento para Distintos Tipos de CSP . . . . .	75
2.34. Estructura Evaluación Multi-criterio . . . . .	77
2.35. Pasos Estructura Evaluación Multicriterio . . . . .	81
2.36. Selección de Criterios . . . . .	82
2.37. Ejemplo de Matriz de Comparaciones de Criterios . . . . .	83
2.38. Escala de preferencias propuesta por Thomas Saaty . . . . .	83
2.39. Ejemplo de Análisis de los Indicadores . . . . .	87
2.40. Ejemplo de Ranking de Alternativas . . . . .	88
3.1. Potencia y profundidad recomendada para cada cimentación . . . . .	100
3.2. Valores de referencia utilizados para la evaluación de riesgos por ingesta, inhalación y contacto dermal, obtenidos de IRIS databases y ASTDR (Toxic Substances Portal). . . . .	108
4.1. Participación por tipo de combustible en la capacidad de generación de la zona. . . . .	116
4.2. Participación por tipo de combustible en la capacidad de generación de la zona. . . . .	117
4.3. Participación por tipo de combustible en la capacidad de generación de la zona. . . . .	118
4.4. Participación por tipo de combustible en la capacidad de generación de la zona. . . . .	119
4.5. Participación por tipo de combustible en la capacidad de generación de la zona. . . . .	120
4.6. Mapa de Mejillones y ubicación de sus centrales térmicas . . . . .	122
4.7. Mapa de Mejillones y ubicación de sus industrias . . . . .	122
4.8. Disponibilidad de Recurso Eólico. . . . .	123
4.9. Disponibilidad de Recurso de Solar. . . . .	124
4.10. Disponibilidad de Recurso Eólico. . . . .	124
4.11. Disponibilidad de Recurso Eólico. . . . .	125
4.12. Disponibilidad de Recurso Eólico. . . . .	126
4.13. Disponibilidad de Recurso Eólico. . . . .	126
4.14. Disponibilidad de Recurso Eólico. . . . .	127
4.15. Mapa de Zona Seleccionada . . . . .	127
4.16. Disponibilidad de Recurso Solar Mensual . . . . .	128
4.17. Ciclos medios de potencia de un sistema fotovoltaico durante un día . . . . .	129
4.18. Potencia inyectada al sistema central Mejillones . . . . .	137
4.19. Distribución de Generación por Tecnología. . . . .	139
4.20. Distribución de Generación por Hora para un Día Tipo. . . . .	140

# 1 | Presentación del tema

## 1.1. Problemática

El término "Zonas de Sacrificio" ha sido acuñado para reflejar aquellos lugares que concentran una gran cantidad de industrias contaminantes, afectando siempre a aquellas comunidades más pobres o vulnerables. [1]

Los conflictos ambientales deben ser afrontados desde una perspectiva de justicia ambiental. Las zonas altamente contaminadas como consecuencia del actual modelo de desarrollo, la falta de políticas públicas y la negligencia de la autoridad, constituyen zonas de sacrificio de derechos fundamentales de las comunidades que allí habitan. Esto ocurre en diversas localidades y comunas a lo largo del país, tales como la Bahía de Quintero, Huasco, Coronel, Tocopilla, Talcahuano y Cabrero. Se trata de comunas con alto índice de pobreza, debilidad en los servicios básicos como agua potable, sistemas de salud deficientes, escasa participación de las personas en las decisiones territoriales; vulneración de un ambiente laboral saludable, así como también al derecho a la educación, ya que niños y niñas estudian en ambientes contaminados, que afectan su desarrollo físico e intelectual [2].

El ambiente influye sobre diversos aspectos del bienestar de la población, y en algunos casos los riesgos a la salud son iniciados, preservados o exacerbados por factores ambientales. La calidad de vida y del ambiente están íntimamente relacionados y representan un complejo espectro de interacciones [3]. Establecer un vínculo causal entre ciertos factores medioambientales y los efectos perjudiciales para la salud plantea muchas dificultades. Entre ellas se citan la lentitud de acumulación de evidencias

para establecer el riesgo de la población expuesta; la variabilidad en la exposición individual, que puede expresarse con diversos trastornos de salud; y el hecho de que los síntomas específicos pueden corresponder a exposiciones diferentes [4].

En Chile hasta el año 2016 existían 20 zonas del país calificadas como zonas Saturadas o Latentes, esto debido al efecto de diversos contaminantes presentes en el medio ambiente, preferentemente partículas respirables, en este caso encontramos: Material Particulado Respirable y Anhídrido Sulfuroso. Estos contaminantes provienen de diversas fuentes, entre los que se destacan los efectos de la industria, transporte, generación de energía eléctrica en plantas termoeléctricas y calefacción.

El material particulado (MP) es el contaminante que más significativamente ha sido asociado a eventos de mortalidad y morbilidad en la población. [5] Este contaminante se clasifica según su diámetro, característica de la cual depende la intensidad de sus impactos. Existen dos métricas comúnmente utilizadas para clasificar el material particulado, partículas menores a 10 micrones conocidas como MP10 y partículas menores a 2,5 micrones, conocidas como MP2,5. De esta forma, en el MP10 se pueden distinguir dos fracciones, la fracción gruesa, es decir, entre 2,5 y 10 micrones y la fracción fina, menor a 2,5 micrones.

La exposición a niveles de anhídrido sulfuroso muy altos puede ser letal. La exposición a 100 partes de anhídrido sulfuroso por cada millón de partes de aire (100 ppm) se considera de peligro inmediato para la salud y peligro mortal. La exposición de larga duración a niveles constantes de anhídrido sulfuroso puede afectar la salud. Por otra parte la exposición a bajos niveles de anhídrido sulfuroso por 20 años o más puede provocar alteraciones en la función pulmonar [6].

Teniendo en cuenta estos efectos sobre las personas se plantea la siguiente interrogante ¿Se debe vulnerar el derecho a vivir en un ambiente limpio de las personas por alcanzar el desarrollo industrial deseado?

### 1.1.1. Tema a Desarrollar

En este trabajo de investigación se busca estudiar las diferentes zonas contaminadas en Chile, ya sean reconocidas legalmente (Zonas saturadas o latentes) o no (

“Zonas de Sacrificio ambiental”). En el presente documento se analizarán la relación entre la contaminación en estas zonas y la generación de energía mediante centrales termoeléctricas.

Para estas zonas se estudiarán los recursos solares y eólicos para cada uno de los territorios afectados y sus zonas adyacentes. Posteriormente y basado en la disponibilidad de recursos se analizará integrar ERNC a la generación local de energía eléctrica, ya sea a través de la implementación de plantas CSP( Centrales de potencia Solar), eólicas terrestres y eólicas del tipo fuera de costa.

Según los resultados de la disponibilidad de recursos y la concentración de centrales termoeléctricas en las distintas zonas, se escogerá una con el fin de ser tomada como guía a la hora de evaluar la factibilidad técnica, económica y social de convertir el actual sistema de generación de energía a uno sustentable con el medio ambiente.

En este estudio se incluyen tópicos de innovación, debido a que se evaluarán formas de generación eléctrica que no han sido utilizados en nuestro país y que no han sido analizados a la hora de entregar una solución a los graves problemas de contaminación que se tienen en las zonas saturadas, latentes o “de sacrificio” que se pueden encontrar en nuestro país.

## **1.2. Objetivos**

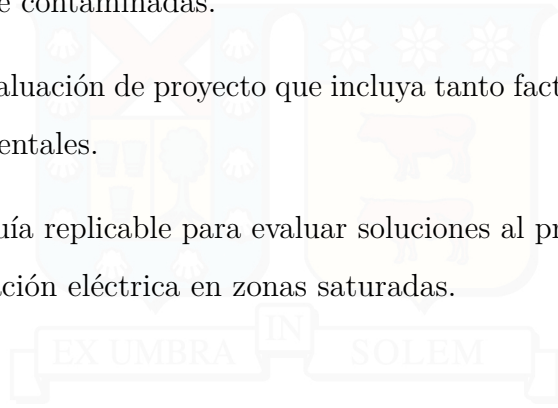
### **1.2.1. Objetivo General**

Generar una solución sustentable desde el punto de vista económico, social y ambiental que optimice los recursos naturales de las zonas de alta contaminación con el fin de reemplazar centrales de generación térmicas ya existentes.

### **1.2.2. Objetivos Específicos**

- Estudiar la relación entre la concentración de partículas contaminantes y la presencia de centrales termoeléctricas.

- Evaluar la disponibilidad de recursos naturales para la generación eléctrica en las distintas zonas saturadas, latentes o “zonas de sacrificio”.
- Realizar una optimización de los recursos naturales disponibles en las distintas zonas altamente contaminadas.
- Realizar una evaluación de proyecto que incluya tanto factores económicos como sociales y ambientales.
- Entregar una guía replicable para evaluar soluciones al problema de contaminación por generación eléctrica en zonas saturadas.

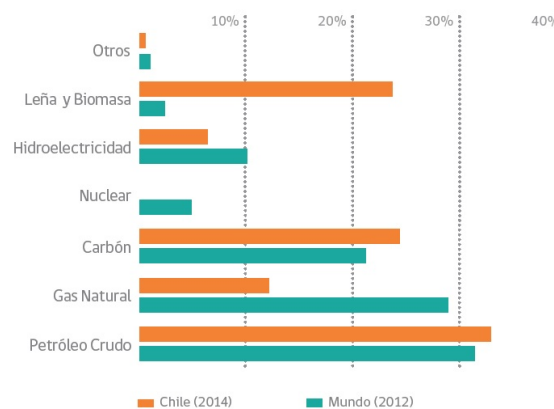


## 2 | Marco Teórico

### 2.1. Contexto Energético Nacional

#### 2.1.1. Matriz Energética Nacional

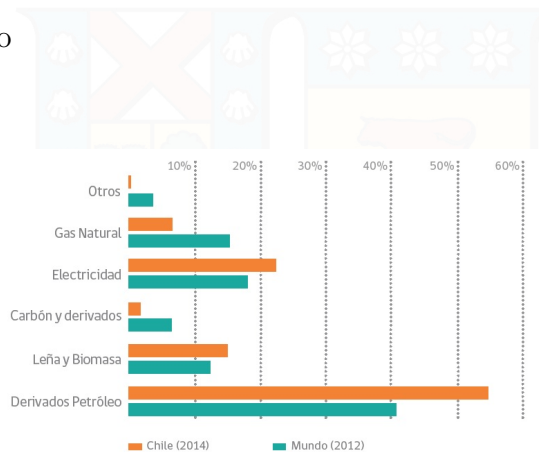
En Chile se ha mantenido una sostenida preponderancia en el consumo de combustibles fósiles a modo de fuente de energía primaria (ver figura 2.1) . Chile no posee reservas de combustibles fósiles capaces de satisfacer la demanda doméstica, lo que implica una fuerte dependencia de los precios internacionales de los combustibles [7].



**Figura 2.1:** Matriz Energética Primaria  
Fuente: Energía 2050, Política Energética Nacional.

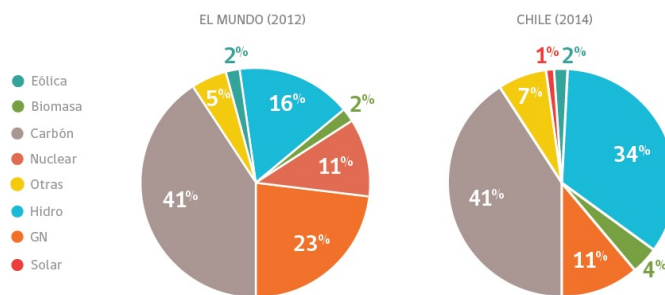
Asimismo, a nivel mundial, la demanda de energía final ha visto un aumento considerable en la participación de la electricidad, la cual ha pasado de una participación de 9,4% en la matriz, a una participación del 18,1% en las últimas cuatro décadas. Junto con este aumento en la participación de la electricidad en la matriz

de energía secundaria o de consumo final, en el período señalado, se ha producido una disminución en la participación de los combustibles fósiles de 75,9% de la matriz a 66% (ver figura 2.2. En Chile, la participación de la electricidad en la matriz de consumo energético final también ha crecido, pero aún continúa por debajo de los derivados del petróleo [8].



**Figura 2.2:** Matriz Energética Secundaria  
Fuente: Energía 2050, Política Energética Nacional.

El mercado eléctrico chileno actual se basa fundamentalmente en la Ley General de Servicios Eléctricos de 1982. Éste, está compuesto por las actividades de generación, transmisión y distribución de suministro eléctrico. Estas actividades son desarrolladas por empresas que son controladas en su totalidad por capitales privados, mientras que el Estado ejerce funciones de regulación, fiscalización y de planificación indicativa de inversiones en generación y transmisión.<sup>1</sup>

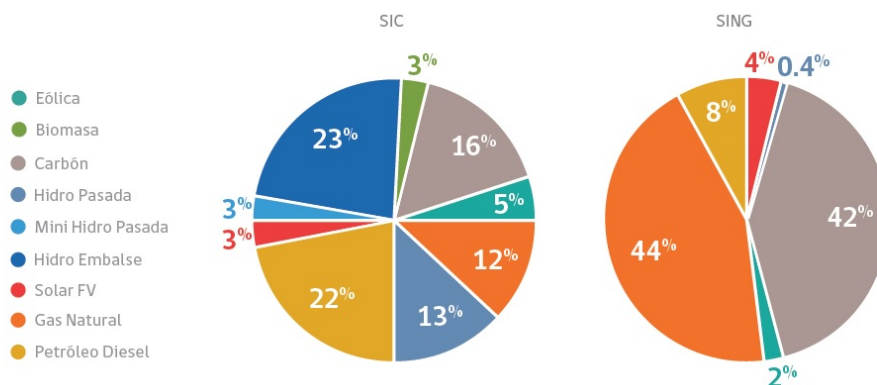


**Figura 2.3:** Fuentes de Generación de Energía en Chile  
Fuente: Energía 2050, Política Energética Nacional.

<sup>1</sup>Ministerio de Energía, 2016.

En el país, los hidrocarburos cubren aproximadamente el 58 % de la matriz eléctrica, mientras que el 30 % corresponde a hidráulica convencional de gran envergadura, es decir, ambos medios cubren el 88 % de la capacidad instalada para generar electricidad de manera convencional. La desagregación por tipo de tecnología de la capacidad instalada se muestra en la figura 2.3:

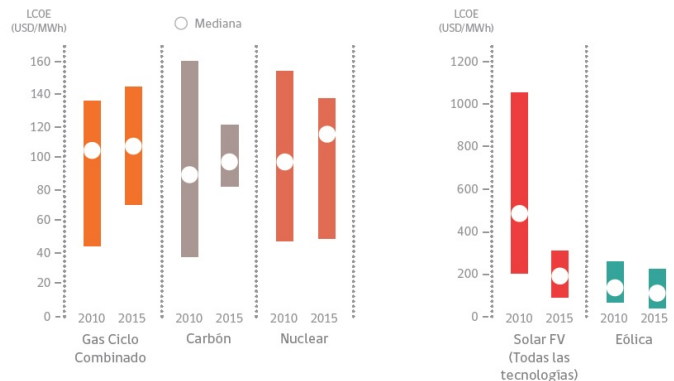
La ley faculta a la autoridad para obligar a la interconexión de las instalaciones eléctricas, con el objeto de garantizar la eficiencia y la seguridad del sistema. La coordinación del sistema de generación en su conjunto se establece a través de un centro coordinador denominado Centro de Despacho Económico de Carga (CDEC), para cada uno de los principales sistemas del país: el Sistema Interconectado del Norte Grande (SING), el cual cubre el Norte del país hasta la región de Antofagasta y el Sistema Interconectado Central (SIC), quien cubre desde la región de Antofagasta hasta la región de los Lagos (ver figura 2.4. Regiones de Aysén y Magallanes poseen sistema de electrificación propio. Los Centros de Despacho Económico de Carga administrado por titulares de empresas generadoras y transmisoras, determina los planes de operación del conjunto de centrales generadoras, líneas de transmisión y subestaciones de poder que conforman el sistema, con el objeto de garantizar que el suministro global se efectúe con un adecuado nivel de seguridad y a un costo global mínimo.



**Figura 2.4:** Matriz Energética SIC y SING  
*Fuente:* Energía 2050, Política Energética Nacional.

### 2.1.2. Tendencias en Fuentes Energéticas

La tendencia es que las energías renovables tendrán costos de desarrollo cada vez menores, mientras que, para las tecnologías convencionales, los costos se mantienen o aumentan (ver figura ?? [9]). Hoy en día, la participación de las energías renovables variables en los sistemas eléctricos, como la solar y la eólica, depende no sólo de sus costos, sino de la flexibilidad del sistema al que éstas se integran. Entre otras condiciones, contribuye a una mejor incorporación de las energías variables, mayores y más flexibles redes de transmisión, con interconexiones regionales e internacionales que faciliten el intercambio de energía. Los sistemas de almacenamiento aparecen también como una opción a futuro, en la medida que el avance tecnológico facilite su incorporación. [8]

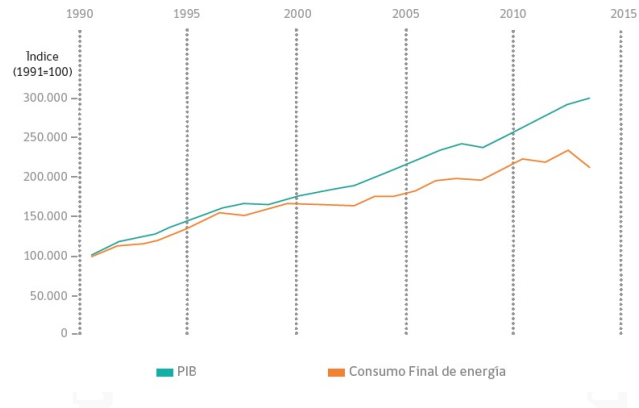


**Figura 2.5:** Costos Proyectados Distintos Tipos de Energía

*Fuente:* IEA. ??

La tendencia internacional apunta a buscar un desacople entre crecimiento y consumo energético mediante una mayor eficiencia energética (ver figura ??). En el caso chileno, el desacople ha sido mayor en los últimos años producto de las medidas de eficiencia introducidas en el sector, así como de los incrementos de precios de la energía que han incentivado un uso más racional de ella. Chile es un país que ostenta un consumo primario de energía per cápita menor que otros países o regiones que cuentan con un mayor nivel de desarrollo económico, alcanza algo menos de la mitad del consumo per cápita que muestran, en promedio, los países de la OCDE. Por lo tanto es esperable que Chile aumente su consumo de energía per cápita en la medida

en que continúe su desarrollo económico. Sobre esto, surge el desafío que presentan los cambios en las tendencias energéticas, sobre cómo se desarrollará la infraestructura energética en cuanto a sus consideraciones ambientales y sociales. [8]



**Figura 2.6:** Relación entre el Aumento del PIB y el Consumo Energético  
*Fuente:* Banco Mundial, Balance de Energía.

### 2.1.3. ERNC En Chile

En marzo de 2016 el mes finalizó con 52 proyectos de Energía Renovable No Convencional declarados en construcción (ver tabla 2.1[10]). La capacidad instalada en ERNC asciende al 12.46 % lo que representa 2496 MW de estos el 90 % se encuentran en el Sistema Interconectado Central. En el año 2015 la inyección de centrales de ERNC fue de 665 GWh, lo que corresponde a un 10.21 % de la generación total (ver figura ??). Los costos marginales en marzo del 2015 fueron de 74 y 49.2 USD/MWh para el SIC y SING respectivamente.

**Tabla 2.1:** Estado de proyectos ERNC en Chile

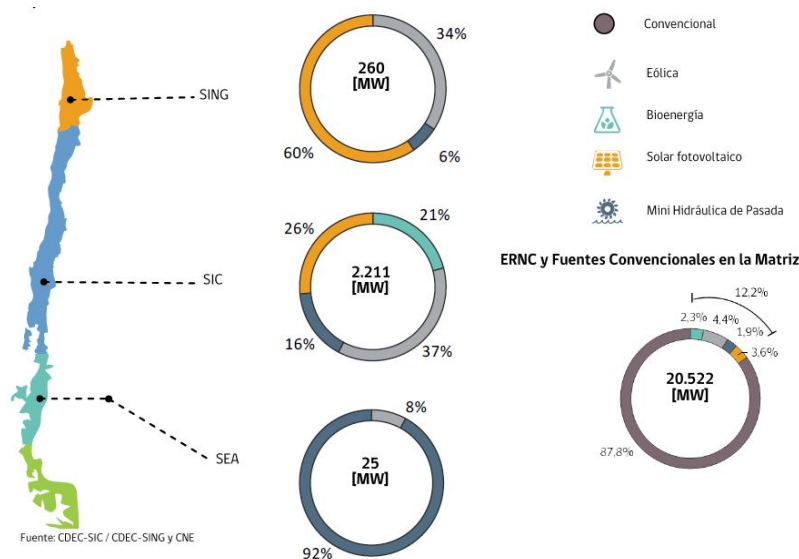
Tecnología	Operación [MW] (*)	Construcción [MW]	RCA Aprobada [MW]	En Calificación [MW]
Biomasa	417	0	112	47
Biogás	53	0	8	0
Eólica	910	428	5.966	1.905
Geotermia	0	48	120	0
Mini Hidro	433	25	455	82
Solar - PV	1.102	2.082	11.363	5.296
Solar - CSP	0	110	980	925
Total	2.916	2.692	19.004	8.255

Fuente: CNE, CDED

SIC,CDEC SING.

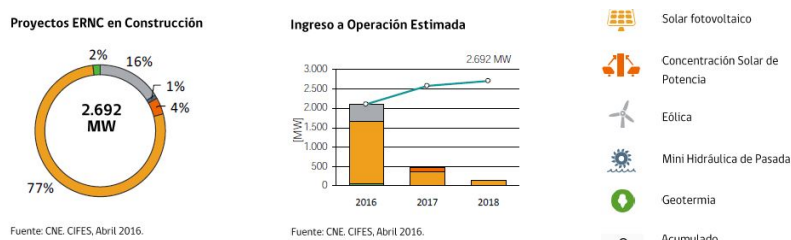
#### Proyectos de ERNC en Construcción

Al 5 de abril del 2016 existen 52 proyectos de ERNC en etapa de construcción los que suman 2692 MW de potencia, estos proyectos tienen una fecha de ingreso a operación entre abril de 2016 y agosto de 2018 (ver figura 2.8[10]). El desarrollo de proyectos ERNC no ha prosperado ya que los proyectos en carpeta no han podido asegurar financiamiento y por sus altos costos de inversión, acceso y conexión a líneas de transmisión. Un proyecto tendrá financiamiento sí y sólo si posee contratos de largo plazo, sin embargo, un cliente firmará un contrato de largo plazo con un proyecto solo si tiene financiamiento aprobado. Este ciclo es el que inhibe muchas veces los proyectos, los clientes no quieren asumir el riesgo de contratar ERNC sin ver las centrales en funcionamiento o en construcción como sucede con la energía solar en



**Figura 2.7:** Participación ERNC en Matriz Energética

Fuente: CNE, CDED SIC, CDEC SING.



**Figura 2.8:** Proyecto ERNC en construcción

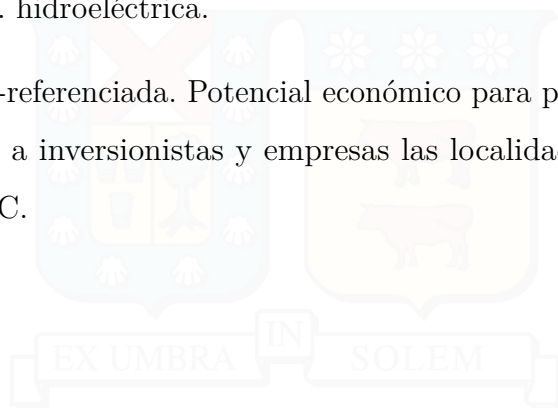
Fuente: CNE, CDED SIC, CDEC SING.

el norte del país[11]. Según proyecciones internacionales los costos de inversión para centrales de generación ERNC no descenderán más de un 10-20 % en la próxima década [12], en consecuencia el desarrollo de proyectos requerirá de otras medidas, que deben provenir del sector público. El Estado ha postulado en su Estrategia Nacional de Energía 2050 cinco medidas para incentivar el desarrollo:

- Reducir barreras para mejorar la competitividad de las fuentes priorizadas, sin contemplar subsidios con efectos que distorsionen el mercado eléctrico.
- Estudiar y aplicar mecanismos para remunerar eficientemente los servicios complementarios tendientes a flexibilizar la operación del sistema eléctrico.
- Estudiar mecanismos que incrementen la flexibilidad del sistema eléctrico a

estándares internacionales.

- Desarrollar un mecanismo de articulación entre los sectores público, privado, académico y de la sociedad civil para la implementación de estándares de sustentabilidad. hidroeléctrica.
- Plataforma geo-referenciada. Potencial económico para proyectos de ERNC: se busca informar a inversionistas y empresas las localidades donde desarrollar proyectos ERNC.



## Energía Solar Fotovoltaica en Chile

La energía solar fotovoltaica es la más desarrollada actualmente en nuestro país, esto debido a que es la que requiere una menor inversión a la hora de construir una central, lo cual combinado con el gran potencial de energía solar que presenta nuestro país la hace muy atractiva a la hora de cumplir con las metas de consumo de energías renovables que se han propuesto recientemente.

**Tabla 2.2:** Estado Proyectos Energía Solar Fotovoltaica en [MW]

	Operación	Construcción	RCA Aprobada	En Calificación
Solar PV	1.267	1.676	12.038	5.434

*Fuente:* CNE (2016)

Actualmente en operación se tienen 1.267 [MW] los cuales representan el 40,62 % del total de todos los proyectos de ERNC que se encuentran operando actualmente en nuestro país, se puede apreciar en la tabla que con resolución aprobada se encuentran 12.038 [MW], aunque estos proyectos difícilmente serán concretados en su totalidad, debido al escaso financiamiento que poseen las ERNC en Chile y la desventaja de vender este tipo de energía debido a que no es entregada de forma constante (ver tablas 2.2 2.3).

**Tabla 2.3:** Participación de la Energía Fotovoltaica en cada una de las Fases con Respecto a las ERNC

	Operación	Construcción	RCA Aprobada	En Calificación
Solar PV	40,62 %	71,75 %	59,25 %	61,64 %

*Fuente:* CNE (2016)

Las centrales fotovoltaicas se encuentran distribuidas en toda la zona norte de nuestro país, aunque de igual forma la mayor cantidad se encuentra en el SIC a diferencia de lo que se podría pensar. Actualmente la central ubicada más al sur del país se encuentra en Santiago (ver figura 2.9).



**Figura 2.9:** Distribución de Centrales de Generación Solar Fotovoltaica  
*Fuente:* Energía Abierta (2016)

### Energía Eólica en Chile

La energía eólica en Chile actualmente cuenta con 947 [MW] en operación, los cuales se encuentran distribuidos en todo el país la central ubicada más al norte se encuentra en Calama tiene una capacidad instalada de 90 [MW] y la más extrema en la zona sur se encuentra en la comuna de Punta Arenas con una potencia de [2,34 MW] la cual consta con 3 aerogeneradores (ver tabla 2.4 y figura 2.10).

**Tabla 2.4:** Estado Proyectos Energía Eólica en [MW]

	Operación	Construcción	RCA Aprobada	En Calificación
Eólica	947	477	6.500	1.949



**Figura 2.10:** Distribución de Centrales de Generación Eólica  
*Fuente:* Energía Abierta (2016)

Actualmente la energía Eólica es la segunda ERNC más desarrollada en nuestro país, cuenta con el 30,36% de la capacidad de generación de las ERNC que se

encuentra en operación, teniendo la ventaja de que el potencial Eólico en Chile se distribuye de norte a sur, teniendo potenciales zonas de construcción de centrales en cada una de las regiones del país, por lo cual es una alternativa a los combustibles fósiles en todas las zonas (ver tabla 2.5. Además se tienen 6.500 [MW] con RCA aprobada, los cuales tienen desventajas similares a la energía solar fotovoltaica al no ser energía continua.

**Tabla 2.5:** Participación de la Energía Eólica en cada una de las fases con respecto a las ERNC

	Operación	Construcción	RCA Aprobada	En Calificación
Eólica	30,36 %	20,42 %	31,99 %	22,11 %

*Fuente:* CNE (2016)

### Energía Solar CSP en Chile

La energía solar de potencia es una de las energías renovables con mayor proyección, esto debido a su capacidad de generar energía a toda hora del día en las condiciones óptimas de trabajo, actualmente en nuestro país no se tienen proyectos en funcionamiento, pero ya se encuentra en construcción la primera planta de 110 [MW] ubicada en la Región de Atacama 2.6.

**Tabla 2.6:** Estado Proyectos Energía Solar CSP en [MW]

	Operación	Construcción	RCA Aprobada	En Calificación
Solar CSP	0	110	1.085	1.270

*Fuente:* CNE (2016)

El proyecto de Atacama 1 tiene un almacenamiento de 17.5 horas que garantiza una producción continuada las 24 horas del día, los 365 días del año. Esto permitirá que por primera vez se integre en el mix energético una planta termosolar como central de carga base. El proyecto fue el ganador de concurso internacional organizado por el Ministerio de Energía de Chile y Corfo para apoyar la construcción de la primera planta termosolar de América Latina. La energía solar fotovoltaica es la más desarrollada actualmente en nuestro país, esto debido a que es la que requiere una

menor inversión a la hora de construir una central, lo cual combinado con el gran potencial de energía solar que presenta nuestro país la hace muy atractiva a la hora de cumplir con las metas de consumo de energías renovables que se han propuesto recientemente.

**Tabla 2.7:** Participación de la Energía Solar CSP en Cada una de las Fases con Respecto a las ERNC

	Operación	Construcción	RCA Aprobada	En Calificación
Solar CSP (%)	0,00 %	4,71 %	5,34 %	14,41 %

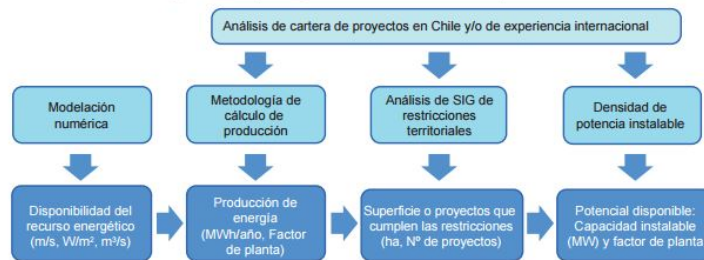
*Fuente:* CNE (2016)

### Energía Eólica Off Shore en Chile

Actualmente en Chile, no existen Parques Eólicos Off Shore debido a que su tecnología no es tan madura. Es por esta razón que no hay muchos estudios con respecto a esta sección de la energía eólica.

## 2.2. Potencial ERNC en Chile

El potencial de ERNC se obtiene del texto publicado por (citar) para obtener el potencial se realiza una modelación numérica que en la mayoría de los casos permite contar con una estimación de la disponibilidad del recurso energético sobre todo el dominio de análisis, en la forma de series temporales de parámetros meteorológicos o hidrológicos, con frecuencia horaria para el caso eólico y solar, y diaria para el hidroeléctrico. Las herramientas de modelación aplicadas son independientes de la información registrada en estaciones de monitoreo, lo cual permite, por una parte, estimar el potencial en áreas donde no existe información observacional, y por otra, usar los antecedentes levantados en dichas estaciones para validar los resultados de los modelos, tal como se podrá apreciar en los capítulos de evaluación del potencial eólico y solar. La siguiente figura muestra un esquema general de la metodología aplicada en este trabajo en la evaluación del potencial de energías renovables. En la siguiente figura se muestra el esquema de trabajo.[13]



**Figura 2.11:** Esquema de evaluación para el potencial de ERNC

*Fuente:* (C. Santana, 2014) [13]

### 2.2.1. Potencial Energía Eólica

De acuerdo al estudio, se estima que Chile posee un potencial en su cartera de proyectos de 6.871 [MW], de los cuales 2.975 MW corresponden a centrales con factor de planta mayor o igual a 0,3. A su vez se determinó el potencial del recurso eólico para el territorio aún no explotado con esta tecnología, para lo cual se establecieron una serie de restricciones que permitan obtener una confiable y óptima cantidad de

hectáreas disponibles para el uso de la energía eólica, los cuales se detallan en la tabla 2.8:

**Tabla 2.8:** Restricciones Aplicadas al Potencial Eólico

Factores	Restricción considerada
Factor de Planta	Superior a 0,3
Altitud	< 3.000 msnm
Pendiente	<15°
Distancia a Centros Urbanos	> 1.000 m
Distancia a Centros Poblados	> 500 m
Distancia a ríos y esteros	> 300 m
Línea de costa	> 100 m
Líneas férreas y red vial	> 60 m
Distancia centrales de cartera de proyectos	> 700 m

*Fuente:* Elaboración propia con datos de [13]

Luego de aplicar estas restricciones al territorio nacional apto para la construcción de centrales eólicas (incluyendo factor de planta y altitud mencionada), se obtiene 2.9, en la cual es posible apreciar la cantidad de hectáreas disponibles en el país para la construcción de centrales. Además, a cada subárea seleccionada se le asignó una densidad de potencia eólica instalable de 10, 20 ó 30 ha/MW, en conformidad con la topografía de la zona y de la densidad de viviendas rurales que contiene. Se descartaron aquellas áreas cuya potencia instalable resultante fuese inferior a 50 MW.

De esta manera, la potencia instalable estimada para zonas en las cuales no existían proyectos eólicos de dominio público al año 2013 que podrían tener factores de planta igual o superiores a 0,3, es decir, el potencial disponible, superaría los 37.000 MW.

**Tabla 2.9:** Potencial Eólico por Región

Región	Sin RT (ha)	Con RT (ha)
De Arica y Parinacota	12.287	
De Tarapacá	134.531	
De Antofagasta	1.459.214	342.340
De Atacama	1.507.785	1.571
De Coquimbo	502.835	11.926
De Valparaíso	87.185	1.707
Metropolitana de Santiago	188.335	34
Del Libertador Gral. Bdo. O'higgins	160.805	2.001
Del Maule	301.176	6.967
Del Biobío	376.750	157.191
De la Araucanía	298.652	95.917
De los Ríos	227.696	91.793
De Los Lagos	1.472.022	470.503
Total	6.729.273	1.181.950

*Fuente:* Elaboración propia con datos de [13]

### 2.2.2. Potencial Solar PV

A diferencia del caso eólico, en la metodología de evaluación del potencial de energía solar utilizando tecnología fotovoltaica, al "potencial disponible" no se le ha descontado la cartera de proyectos fotovoltaicos. Respecto a los resultados obtenidos, el potencial fotovoltaico es tres órdenes de magnitud superior a la cartera de proyectos de dominio público, por ende, es marginal la participación de las actuales centrales en funcionamiento o en evaluación. La tabla 2.10 resume las restricciones territoriales que se aplicaron sobre el dominio de análisis en la estimación del potencial solar asociado a proyectos fotovoltaicos. La última restricción se establece de modo de

**Tabla 2.10:** Restricciones Aplicadas al Potencial Solar Fotovoltaico

Factores	Restricción considerada
Factor de Planta (eje horizontal)	Superior a 0,3
Factor de Planta anual (arreglo fijo)	Superior a 0,24
Pendiente	<10° exposición norte
Distancia a Centros Urbanos	> 500 m
Distancia a ríos y esteros	> 300 m
Zonas Protegidas	Santuarios de la Naturaleza
Línea de costa	> 100 m
Líneas férreas y red vial	> 60 m
Área mínima continua	15 ha

*Fuente:* Elaboración propia con datos de [13]

seleccionar sólo aquellas áreas que permitan acoger un proyecto de a lo menos 3 MW de capacidad instalada, es decir, 15 hectáreas. Con esto se establece una central tipo granja PV, con el cual deben someterse a evaluación de SEIA. La siguiente tabla resume por región los resultados considerando sólo las zonas que cumplen el conjunto de condiciones establecidas para el potencial solar fotovoltaico. De acuerdo a ella, el potencial disponible para ambos tipos de configuraciones de proyectos PV sería superior al millón de MW de capacidad instalable, la cual se encuentra concentrada en las regiones del Norte Grande, especialmente en la segunda región de Antofagasta

(ver tabla 2.11.

**Tabla 2.11:** Potencial Solar Fotovoltaico por Región

Región	Arreglo fijo		Arreglo con Seguimiento	
	Superficie (ha)	Capac (MW)	Superficie (ha)	Capac (MW)
De Arica y Parinacota	104.015	20.803	205.024	41.005
De Tarapacá	309.163	61.833	1.055.670	211.134
De Antofagasta	4.995.313	999.063	6.003.064	1.200.613
De Atacama	769.467	153.893	920.363	184.072
De Coquimbo	11.442	2.288	16.201	3.240
De Valparaíso	117	23	319	64
Total	6.189.517	1.237.903	8.200.641	1.640.128

*Fuente:* Elaboración propia con datos de [13]

### 2.2.3. Potencial Solar CSP

Para el cálculo del potencial de estos sistemas, al igual que en el apartado anterior, no fue considerada la cartera de proyectos en operación (alrededor de 100MW a Febrero 2016), en construcción o evaluación de impacto ambiental, dado que los órdenes de magnitud de éstos son mínimos en comparación con la disponibilidad total de recurso para instalación de CSP. Las restricciones de instalación para este tipo de tecnologías es similar a la solar fotovoltaica, la que se detalla en la tabla 2.12:

El último factor contabiliza una sección continua de terreno en el cual se puede instalar una central de tipo CSP para que cuente con al menos 50 MW de capacidad instalada. De acuerdo a los criterios de instalación determinados por [13] en la tabla 2.12 se resumen los resultados por región para las zonas que cumplen el conjunto de condiciones establecidas para el potencial solar - CSP, incluyendo un factor de planta mayor a 0,5 y en áreas con un mínimo de 200 hectáreas de extensión continua.

**Tabla 2.12:** Restricciones Aplicadas al Potencial Solar

Factores	Restricción considerada
Factor de Planta anual	Superior a 0,5
Pendiente	$>1,8^\circ$
Distancia a Centros Urbanos	$> 500$ m
Distancia a ríos y esteros	$> 300$ m
Zonas Protegidas	Santuarios de la Naturaleza
Línea de costa	$> 100$ m
Líneas férreas y red vial	$> 60$ m
Área mínima continua	200 ha

*Fuente:* Elaboración propia con datos de [13]

**Tabla 2.13:** Potencial Solar CSP por Región

Región	Superfici (ha)	Capac (MW)
De Arica y Parinacota	25.242	6.311
De Tarapacá	544.339	136.085
De Antofagasta	1.579.472	394.868
De Atacama	62.427	15.607
Total	2.211.480	552.871

*Fuente:* Elaboración propia con datos de [13]

## 2.3. Mercado Eléctrico Nacional

### 2.3.1. Marco Institucional

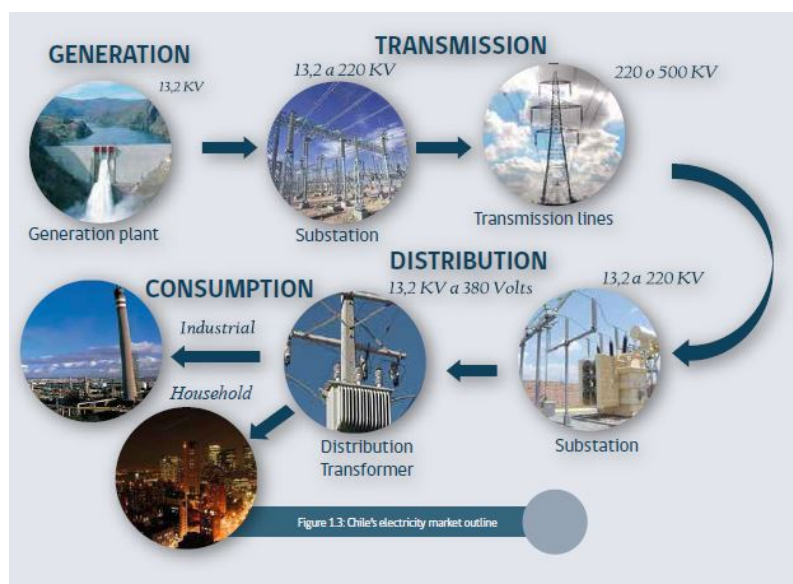
En Chile, existen diferentes instituciones y organismos cuya gestión y actividad normativa está vinculada directamente al sector eléctrico. En este segmento, presentamos aquellas que participan de manera más relevante en el ámbito de la política, regulación y fomento del segmento energético.

#### Ministerio de energía

Es el órgano superior de colaboración del Presidente de la República en las funciones de gobierno y administración del sector energía. Creado por la Ley 20.402 que entró en vigencia el 1 de febrero de 2010. Su objetivo es elaborar y coordinar los planes, políticas y reglamentos para el buen funcionamiento y desarrollo del sector, velar por su cumplimiento y asesorar al Gobierno en todas aquellas materias relacionadas con el desarrollo energético. La Ley establece que el ámbito de competencia del Ministerio está centrado en todas las actividades de estudio, exploración, explotación, generación, transmisión, transporte, importación y exportación, almacenamiento, distribución, consumo, uso eficiente, y cualquiera otra que concierna a la electricidad, carbón, gas, petróleo y derivados, energía nuclear, geotérmica y solar, y demás fuentes energéticas. Asimismo, la creación del Ministerio del ramo reorganizó las atribuciones del sector público en lo referido al ámbito energético, concentrando en esta nueva institución las funciones propias del sector y que previamente se encontraban en los Ministerios de Minería y de Economía, Fomento y Turismo. Se modificó la dependencia de la Comisión Nacional Energía (CNE), la Superintendencia de Electricidad y Combustibles (SEC) y la Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN), que pasaron a relacionarse con el Presidente de la República a través de la cartera de Energía.

### 2.3.2. Agentes del Mercado

El mercado eléctrico en Chile es operado por 81 empresas privadas. Las generadoras, según el tipo de fuente energética que posean, producen la energía para cumplir con los contratos de suministro con los clientes libres, empresas distribuidoras o simplemente inyectarla a la red al mercado spot en caso de no contar con contratos. Las empresas de transmisión realizan el transporte de la energía, generalmente en largas distancias. Las distribuidoras, reciben la energía eléctrica para abastecer a clientes en media o baja tensión dentro del área de concesión de distribución. De esta forma, en el mercado de electricidad se han separado las actividades de generación, transmisión y distribución, cada una de las cuales tiene un tratamiento regulatorio diferenciado. En el caso de la generación, debe verificarse la inexistencia de economías de escala significativas, de modo de favorecer la competencia en la etapa de producción de electricidad, y así impulsar precios por medio del esquema de costos marginales.



**Figura 2.12:** Estructura del Mercado Eléctrico Nacional

*Fuente:* Manual de Conexión de proyectos ERNC, Ministerio de energía.

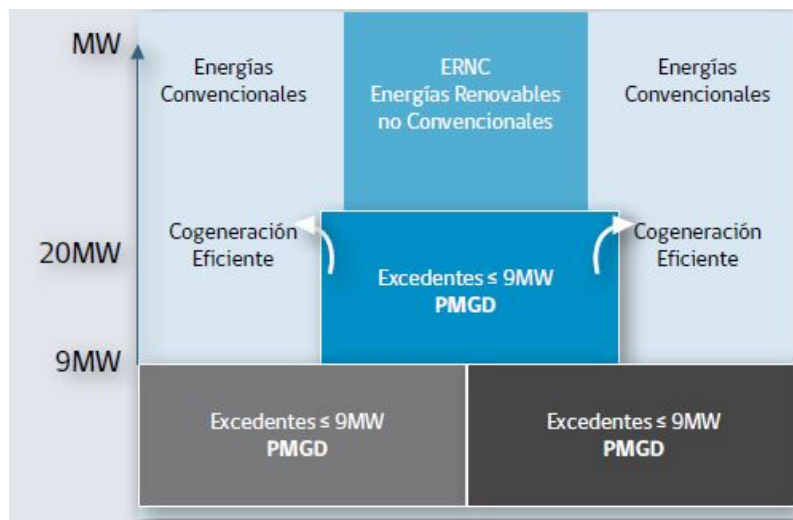
En el caso de la distribución, se concibe que las economías de escala no sean significativas para empresas de distinto tamaño con densidad de carga similar. Esto se traduce en que al aumentar el volumen de potencia distribuida por efectos de

ampliación de la zona de cobertura, sin cambios notables de densidad, los costos medios se mantienen en niveles similares. Por el contrario, si el volumen de potencia distribuida aumenta en una superficie constante, se verifican disminuciones relevantes en los costos medios. Este efecto es llamado economías de densidad, y caracteriza a la actividad de distribución como monopolio natural en una zona de características dadas, aunque permite la existencia de una diversidad de empresas de distinto tamaño operando en zonas distintas, con tarifas iguales para todas las empresas de densidad similar. Las señales de eficiencia se obtienen por medio de la implementación de un sistema de precios por zona tipo, con la determinación de los costos incurridos por una empresa ficticia eficiente, con la cual deben competir cada una de las distribuidoras de la zona. La transmisión, por su parte, presenta significativas economías de escala y de densidad, lo cual le otorga carácter de monopolio natural. En este caso, las condiciones de eficiencia general se obtienen utilizando un sistema tarifario que permita cubrir óptimamente los costos de inversión y operación, y definiendo condiciones de acceso no discriminatorio a todos los usuarios.

### **Segmento de Generación**

Este segmento está constituido por el conjunto de 40 empresas eléctricas propietarias de centrales generadoras de electricidad. Se caracteriza por ser un mercado competitivo, con economías de escala en los costos variables de operación y en el cual los precios reflejan el costo marginal de producción. La matriz de generación eléctrica nacional, se conforma principalmente por generadoras térmicas e hidráulicas, donde las térmicas utilizan como combustibles principales el gas natural, carbón y los derivados del petróleo. Las fuentes de generación convencionales corresponden a centrales hidráulicas de gran tamaño, térmicas a base de combustible fósiles, centrales nucleares, etc. La denominada “Ley ERNC” (Ley 20.257) modificó la LGSE incorporando la definición de medios de generación renovables no convencionales (ERNC), definiéndolos como:

- Aquellos cuya fuente de energía primaria sea la energía de la biomasa, correspondiente a la obtenida de materia orgánica y biodegradable, la que puede ser



**Figura 2.13:** Clasificación de medios de generación renovables no convencionales.

*Fuente:* Compendio energético 2011.

usada directamente como combustible o convertida en otros biocombustibles líquidos, sólidos o gaseoso. Se entenderá incluida la fracción biodegradable de los residuos sólidos domiciliarios y no domiciliarios.

- Aquellos cuya fuente de energía primaria sea la energía hidráulica y cuya potencia máxima sea inferior a 20.000 kW.
- Aquellos cuya fuente de energía primaria sea la geotérmica, entendiéndose por tal la que se obtiene del calor natural de la tierra.
- Aquellos cuya fuente de energía primaria sea la energía solar, obtenida de la radiación solar.
- Aquellos cuya fuente de energía primaria sea la energía eólica, correspondiente a la energía cinética del viento.
- Aquellos cuya fuente de energía primaria sea la energía de los mares, correspondiente a toda forma de energía mecánica producida por el movimiento de las mareas, de las olas y de las corrientes, así como la obtenida del gradiente térmico de los mares.
- Otros medios de generación determinados fundadamente por la Comisión Na-

cional de Energía, que utilicen energías renovables para la generación de electricidad, contribuyan a diversificar las fuentes de abastecimiento de energía en los sistemas eléctricos y causen un bajo impacto ambiental, conforme a los procedimientos que establezca el reglamento.

Asimismo, se define a la cogeneración eficiente como toda “instalación en la que se genera energía eléctrica y calor en un solo proceso de elevado rendimiento energético, cuya potencia máxima suministrada al sistema sea inferior a 20.000 kW y que cumpla los requisitos a establecerse en un futuro reglamento. En especial, no se consideran ERNC las instalaciones de cogeneración eficiente a menos que utilicen biomasa como energético primario u otro energético primario tipo renovable”.

### **Sector Transmisión**

Son las empresas que transportan energía eléctrica desde los centros excedentarios a los deficitarios. Actualmente en el país, los niveles de tensión empleados en el sector de transmisión cubren el rango comprendido entre tensiones mayores a 23 [kV] hasta los 500 [kV]. En Chile, el sistema de transmisión se divide en tres segmentos conocidos como transmisión troncal, subtransmisión y transmisión adicional. Con excepción de la transmisión adicional, este segmento es un mercado regulado, donde el peaje o cargo por uso del sistema es determinado por los CDEC respectivos. Sistema de Transmisión Troncal: De acuerdo a lo dispuesto en el DFL N°4, de 2007, del Ministerio de Economía, Fomento y Reconstrucción, estas instalaciones deben cumplir con las siguientes características:

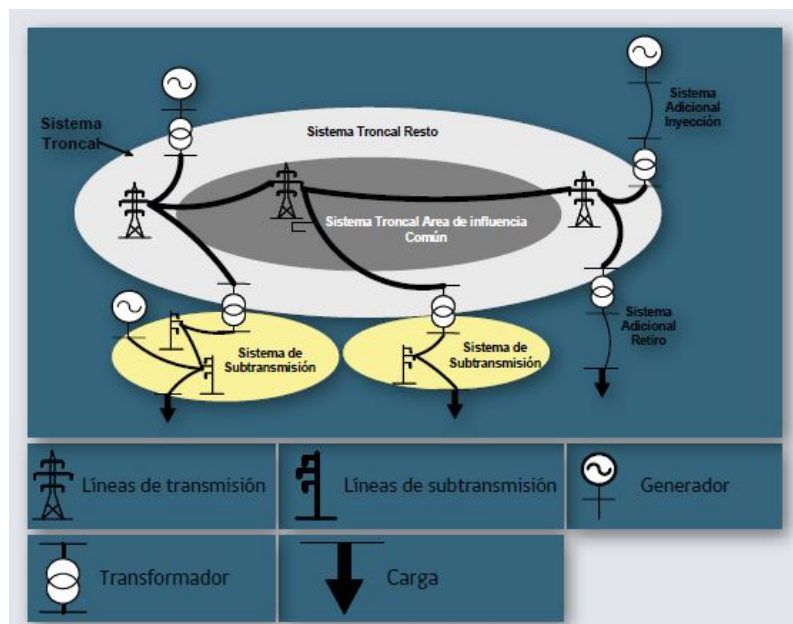
- La tensión nominal de la línea de transmisión debe ser mayor o igual a 220kV.
- La magnitud de los flujos en estas líneas no está determinada por el consumo de un número reducido de consumidores.
- Los flujos en las líneas no son atribuidos exclusivamente al consumo de un cliente, o a la producción de una central generadora o de un grupo reducido de centrales.

- Las líneas poseen tramos con flujos bidireccionales relevantes.

Para el SIC el sistema de transmisión troncal comprende las instalaciones energizadas a niveles de tensión superior o igual a 220kV entre los nudos Diego de Almagro y Puerto Montt, y a su vez el área de influencia común (AIC) de las instalaciones ubicadas entre las barras Nogales y Charrúa. El AIC se define en el artículo 102 c) de la LGSE como “el área, fijada para efectos de remuneración del sistema troncal, constituida por el conjunto mínimo de instalaciones troncales entre dos nudos de dicho sistema, en la que concurren, simultáneamente, las siguientes características”:

- Que entre dichos nudos se totalice al menos un setenta y cinco por ciento de la inyección total de energía del sistema
- Que entre dichos nudos se totalice al menos un setenta y cinco por ciento de la demanda total del sistema
- Que la densidad de la utilización, dada por el cociente entre el porcentaje de inyecciones dentro del área de influencia común respecto de las inyecciones totales del sistema y el porcentaje del V.I. de las instalaciones del área de influencia común respecto del total de instalaciones del sistema troncal, sea máxima.

Sistema de subtransmisión: Se entiende por sistema de subtransmisión a aquellas instalaciones que están interconectadas al sistema eléctrico, y dispuestas para el abastecimiento exclusivo de grupos de consumidores finales, libres o regulados, ubicados en zonas de concesión de empresas distribuidoras. Adicionalmente, las instalaciones de subtransmisión no pueden calificar como instalaciones troncales de acuerdo a lo definido en el Artículo 74 de la LGSE y que los flujos en las líneas no sean atribuidos exclusivamente al consumo de un cliente o a la producción de una central generadora o de un grupo reducido de centrales generadoras. En general, los sistemas de subtransmisión operan a niveles de tensión entre 66 kV y 220 kV. Sistemas adicionales: Los sistemas de transmisión adicionales son aquellos destinados principalmente al suministro de energía eléctrica a usuarios no sometidos a regulación de precios, y por



**Figura 2.14:** Clasificación del sistema de transmisión.

*Fuente:* Compendio energético 2011.

aquellas cuyo objeto principal es permitir a los generadores inyectar su producción al sistema eléctrico. Actualmente, en el SING existen 105 líneas de transmisión adicionales en niveles de tensión entre 66 y 345 kV. Mientras que en el SIC el número asciende a 380 y utiliza niveles de tensión entre 33 y 500 kV. En el SING, la total longitud de líneas instaladas corresponde a 7.099 km y una capacidad instalada de 19.723 MVA (megavoltamperio), en cambio en el SIC la longitud total de líneas de transmisión instaladas es de 12.918 km.

### Segmento de Distribución

Son las empresas con concesión de servicio de distribución en una zona geográfica determinada. Fundamentalmente, operan y mantienen las instalaciones de distribución en un mercado que es regulado por la CNE, a través del Valor Agregado de Distribución (VAD) y por precios de licitaciones de energía, los cuales son transferidos a los clientes regulados. De acuerdo a la CNE, los sistemas de distribución están constituidos por las líneas, subestaciones y equipos que permiten llevar la electricidad hasta los consumidores finales, localizados en cierta zona geográfica explícitamente limitada. Las empresas de distribución operan bajo un régimen de concesión de servicio público

de distribución, con obligación de servicio y con tarifas reguladas para el suministro a clientes regulados. Los sistemas eléctricos de distribución se desarrollan sobre la base de la localización y crecimiento de la demanda. El crecimiento horizontal (geográfico) de la demanda corresponde al incremento de la población y las viviendas, el cual está ligado a los planes de desarrollo urbano. Por otra parte, el crecimiento vertical (intensidad de consumo) de la demanda, se relaciona con el incremento del ingreso y el desarrollo tecnológico asociado a mayor acceso en equipos electrodomésticos en el sector residencial y de automatización en el sector industrial. Las empresas que poseen la mayor cantidad de clientes regulados son Chilectra y CGE Distribución, que operan en el sector que concentra el 51 % de la población. En conjunto, ambas poseen el 53,86 % del total de clientes regulados del país, 5.203.805 de clientes regulados aproximadamente. De acuerdo a lo estipulado en el Reglamento de la LGSE, DS 327/1997, se determina que en los Sistemas de Distribución (SI) se diferencian dos niveles de tensión:

- Alta tensión en distribución: definida para tensiones entre 400 V y 23.000 V.
- Baja tensión en distribución: definida para tensiones inferiores a 400 V.

De acuerdo con lo anterior, los alimentadores de los sistemas de distribución (alta tensión en distribución) operan en diferentes tensiones comprendidas entre los rangos especificados, como por ejemplo: 12, 15 y 23 kV. Por otro lado, las redes de distribución de baja tensión operan a 220/380 V.

### **Clientes Regulados**

Los clientes regulados son aquellos para los cuales el precio y la calidad de suministro son regulados según el cálculo tarifario por la CNE para el periodo correspondiente y las normativas vigentes respectivamente. Se trata de clientes cuya potencia conectada es inferior a 2MW, ubicados en zonas de concesión de servicio público de distribución o que se conecten mediante líneas de su propiedad o de terceros a las instalaciones de distribución de la respectiva concesionaria.

### Cliente Libre

Se refiere a aquellos consumidores cuya potencia conectada es superior a 2 MW, son clientes no sometidos a regulación de precios y que pueden optar a precios libremente pactados. También pueden ser clientes que, teniendo una potencia conectada menor o igual a 2 MW, cumpla con alguna de las siguientes condiciones:

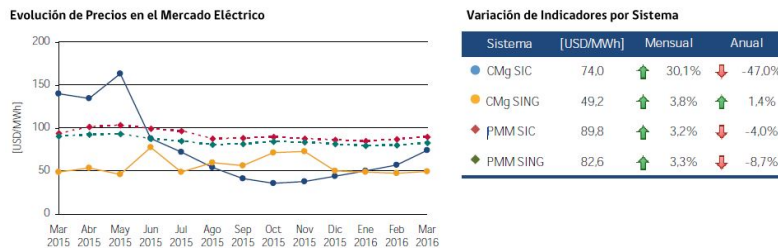
- Cuando se trate de servicio por menos de doce meses.
- Cuando se trate de calidades especiales de servicio.
- Cuando el momento de carga del cliente respecto de la subestación de distribución primaria sea superior a 20 MW-km.
- Cuando la potencia conectado del cliente sea superior a 500 KW. En este caso, el cliente tendrá derecho a optar por un régimen de tarifa regulada o de precio libre, por un periodo mínimo de cuatro años de permanencia en cada régimen. El cambio de opción debe ser comunicada a la concesionaria de distribución con una antelación de, al menos, 12 meses.

Los clientes libres poseen una mayor capacidad de negociación en virtud de su tamaño, ya que no son clientes exclusivos de la empresa distribuidora a la concesión que pertenecen, sino que puede pactar los precios libremente con las empresas generadoras o distribuidora .

### Estructura del Mercado Eléctrico

En marzo el costo marginal del SING fue 49.2 USD/MWh, este valor muestra un aumento de 3.8 % respecto al mes de febrero de 2016 y también un crecimiento de 1.4 % en relación al año anterior en el mismo mes. En el caso del SIC el costo marginal fue de 74 USD/MWh, representa un aumento de 30.1 % respecto a febrero de 2016 y un 47 % respecto a marzo de 2015. En marzo el precio medio de mercado del SING fue 82.6 USD/MWh, este valor muestra un aumento de 3.3 % respecto al mes de febrero de 2016 y un decrecimiento de 8.7 % en relación al año anterior en el

mismo mes. En el caso del SIC el precio medio de mercado fue de 89.8 USD/MWh, representa un aumento de 3.2 % respecto a febrero de 2016 y un 4 % menor respecto a marzo de 2015.



**Figura 2.15:** Costos generación para los Sistemas Interconectados  
*Fuente:* CNE, CDED SIC, CDEC SING.

## 2.4. Contaminación ambiental en Chile

### 2.4.1. Contaminación del aire

Múltiples estudios nacionales e internacionales han mostrado que existe una asociación entre el nivel de concentración de contaminantes como material particulado (MP), ozono (O<sub>3</sub>), dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) y dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) y la incidencia de muertes prematuras y varias enfermedades cardiorrespiratorias, tanto en niños como en adultos. Además, existe evidencia de efectos ambientales, tales como disminución de visibilidad, daños a los materiales e impactos en la flora y fauna (ver figura 2.16) [14].

EFEECTO	DESCRIPCIÓN
Daño a la salud	Las partículas y compuestos emitidos al aire en ciertas concentraciones pueden producir efectos nocivos en la salud de las personas como, por ejemplo, reducción de la función pulmonar, aumento de la susceptibilidad de contraer infecciones respiratorias, muertes prematuras y cáncer, entre otros.
Disminución en visibilidad	La presencia de partículas en el aire reduce la visibilidad causando una disminución en el bienestar y la calidad de vida.
Daño a materiales	El exceso de contaminación atmosférica puede causar daños en los materiales de construcción, alterando las propiedades físicas y químicas de los mismos.
Daño a ecosistemas acuáticos	Altas concentraciones de NO <sub>x</sub> y SO <sub>2</sub> pueden producir deposición ácida en el agua, modificando su composición y dificultando la supervivencia de especies acuáticas.
Daño en plantas y bosques	La deposición ácida en suelos puede alterar el crecimiento de plantas y árboles. Además el ozono y otras partículas pueden ingresar a través de los estomas de las plantas y dañar su estructura.

**Figura 2.16:** Efectos de los contaminantes  
Fuente: MMA(2011)

El material particulado (MP) es el contaminante que más significativamente ha sido asociado a eventos de mortalidad y morbilidad en la población [5]. Este contaminante se clasifica según su diámetro, característica de la cual depende la intensidad de sus impactos. Existen dos métricas comúnmente utilizadas para clasificar

el material particulado, partículas menores a 10 micrones conocidas como MP10 y partículas menores a 2,5 micrones, conocidas como MP2,5. De esta forma, en el MP10 se pueden distinguir dos fracciones, la fracción gruesa, es decir, entre 2,5 y 10 micrones y la fracción fina, menor a 2,5 micrones.

Cabe señalar que la fracción fina, MP2.5, está compuesta por partículas suficientemente pequeñas que penetran en las vías respiratorias hasta llegar a los pulmones y los alvéolos, lo que aumenta el riesgo de mortalidad prematura por efectos cardiopulmonares, en exposiciones de corto y largo plazo [15]. En cuanto a la fracción gruesa, MP10, de acuerdo con la Agencia de Protección Ambiental de EE.UU. (EPA), si bien existe una aparente relación entre la exposición de corto plazo y los efectos respiratorios y cardiovasculares, no existe evidencia suficiente para constatar potenciales efectos por exposición de largo plazo [16].

Se define el concepto de contaminante como todo elemento, compuesto, sustancia, derivado químico o biológico, energía, radiación, vibración, ruido, o una combinación de ellos, cuya presencia en el ambiente, en ciertos niveles, concentraciones o períodos de tiempo, pueda constituir un riesgo a la salud de las personas, a la calidad de vida de la población, a la preservación de la naturaleza o a la conservación del patrimonio ambiental.<sup>2</sup>

Chile cuenta con normas primarias de calidad ambiental de alcance nacional, que regulan la concentración en el aire de seis tipos de contaminantes, identificados como los principales y más nocivos para la salud (ver figura 2.14). Dichas normas, regulan concentraciones máximas respecto a material particulado, tanto MP10, como MP2,5, así como respecto a dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), ozono troposférico (O<sub>3</sub>), monóxido de carbono (CO) y Plomo (Pb). La siguiente tabla presenta una descripción de algunas normas primarias de calidad del aire vigentes en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  [14]

Para evaluar el estado de la calidad del aire, en relación con los estándares establecidos en las normas primarias de calidad ambiental, se analizan los registros de las estaciones de monitoreo con representatividad poblacional (EMRP). En el país,

---

<sup>2</sup>Ley 19.300, Bases del Medio Ambiente

CONTAMINANTE	NIVEL	MÉTRICA	EXCEDENCIA
O <sub>3</sub>	120	Promedio móvil de 8 horas	Percentil 99
MP <sub>10</sub>	50	Media aritmética trianual	No se permite
	150	Media aritmética diaria	Percentil 98
MP <sub>2,5</sub>	20	Media aritmética anual	No se permite
	50	Media aritmética diaria	Percentil 98
SO <sub>2</sub>	80	Media aritmética anual	No se permite
	250	Media aritmética diaria	Percentil 99
NO <sub>2</sub>	100	Media aritmética anual	No se permite
	400	Media aritmética horaria	Percentil 99

**Tabla 2.14:** Normas Primarias de calidad vigentes  
Fuente: MMA(2011)

además, existen estaciones de monitoreo privadas, la mayor parte de las cuales han sido instaladas en el marco de las exigencias establecidas en resoluciones de calificación ambiental, como mecanismo de seguimiento de los impactos de los proyectos o de planes de descontaminación, como es el caso de las redes de seguimiento de las fundiciones de cobre.

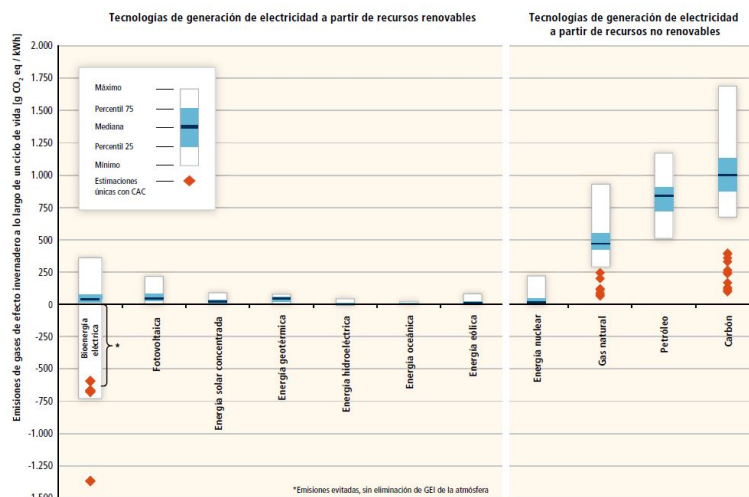
En Chile y particularmente en la zona norte existe un aumento de la concentración de material particulado 2.5 debido a que existe mayor presencia de actividades como generación termoeléctrica o fundiciones de cobre, esto comparado con otras ciudades de la misma zona. [14]

De acuerdo con estos antecedentes, es posible estimar que en Chile al menos 10 millones de personas están expuestas a una concentración promedio anual de MP2,5 superior a 20 microgramos por metro cúbico. Asimismo, y siguiendo la metodología propuesta por MMA [17], se estima que más de 4.000 personas mueren prematuramente al año por enfermedades cardiopulmonares asociadas a la exposición crónica a MP2,5. Esta cifra representa más del doble del número de fatalidades por accidentes de tránsito <sup>3</sup>.

<sup>3</sup>Comisión nacional de seguridad de tránsito 2010.

### 2.4.2. Emisiones generadas por centrales termoeléctricas

Es sabido que distintos tipos de generación energética tendrán distintos impactos en el medio ambiente, una forma de cuantificar estos impactos es obtener las emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente para cada tipo de tecnología, en la figura 2.17 se pueden apreciar los niveles de emisión según tecnología, incluyendo las renovables.

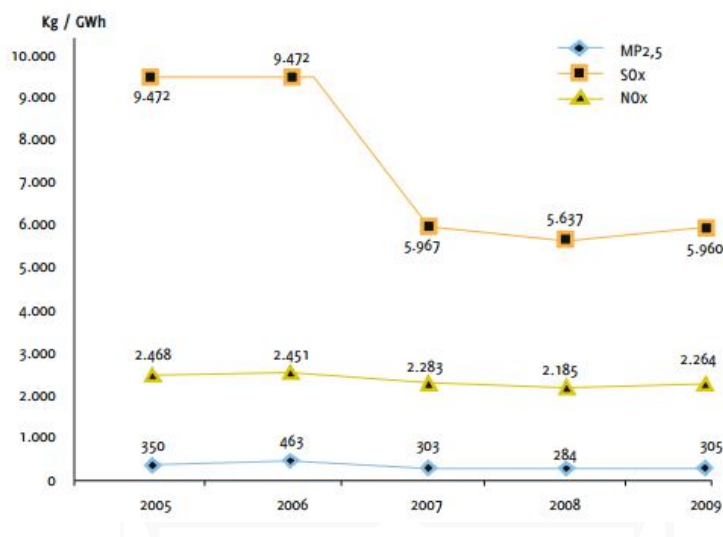


**Figura 2.17:** Emisión de GEI por tipo de Tecnología

Fuente: [18]

En Chile, el sector termoeléctrico ha dado signos de un crecimiento importante en los últimos 20 años, impulsado básicamente por proyectos sustentados en el uso del carbón, lo que ha significado que este combustible constituya el principal insumo del sector, representando en 2009 cerca del 44% de la generación termoeléctrica total del país. Los principales contaminantes emitidos en el proceso de combustión de termoeléctricas corresponden a material particulado (MP), dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) y metales pesados como el mercurio (Hg). Las emisiones de estos contaminantes varían dependiendo del combustible utilizado y los equipos de abatimiento que incluya la central. De acuerdo con esto, las emisiones contaminantes por GWh generado, son bastante menores en centrales de ciclo combinado que utilizan gas natural. No se pueden apreciar reducciones importantes en las emisiones de centrales termoeléctricas, con excepción del SO<sub>2</sub>, cuya disminución ha sido consecuencia de las mayores exigencias de abatimiento en nuevas centrales

establecidas en las resoluciones de calificación ambiental del SEIA. [14]



**Figura 2.18:** Emisiones centrales termoeléctricas por unidad de energía generada en el tiempo – SIC y SING

*Fuente:* Informe Ambiental (2011)

Las centrales termoeléctricas con sistemas de refrigeración sin re-circulación consumen grandes volúmenes de agua que muchas veces son extraídos desde cuerpos marinos, para luego de usarlos volver a verterlos en los mismos cuerpos de agua, pero en distintos puntos y a una temperatura mucho mayor. En el caso de la succión del agua se involucra el arrastre de organismos acuáticos, ya sean de tamaño pequeño como plancton, larvas, huevos y micro algas u organismos de mayor tamaño. Los primeros pueden resultar gravemente afectados, hasta morir debido al estrés físico producido por el calor al que serán expuestos o por los productos químicos que son utilizados para limpiar el sistema, por otra parte, los de gran tamaño pueden resultar muertos debido a que son atrapados contra los filtros de malla o rejillas que cuentan las estructuras de succión [19].

### Tipos de centrales termoeléctricas

Existen diversos tipos de centrales termoeléctricas, estas dependen del tipo de combustible que utilicen, el cual puede ser sólido, líquido o gaseoso. Los combustibles más utilizados en las centrales termoeléctricas de nuestro país son el carbón, gas natural y diésel, además desde hace unos años hasta ahora se ha ido agregando

la biomasa como combustible importante a la hora de generar energía mediante combustión.

- **Combustibles Sólidos:** Hay numerosos tipos de generadores a vapor que operan con carbón o biomasa. Los sistemas de generación de vapor mediante la combustión con carbón están diseñados para usar carbón pulverizado, por lo que el combustible antes de entrar a los quemadores debe ser procesado.
- **Combustibles Gaseosos:** Calderas que Consumen Combustibles Gaseosos Este tipo de calderas son prácticamente iguales a las que consumen petróleo, y en la práctica existen equipos con quemadores duales (gas, petróleo). Los quemadores inyectan el gas a presión el que se dispersa fácilmente en el aire lo que genera condiciones apropiadas de combustión.
- **Turbinas a gas de ciclo abierto:** Centrales de generación mediante turbinas a gas en ciclo abierto Los sistemas de turbina a gas operan en forma similar a los sistemas de turbina a vapor, salvo que los gases de la combustión son usados directamente para mover los alabes de la turbina en vez del vapor.
- **Centrales de generación en ciclo combinado:** Es una configuración que usa tanto turbinas a gas como turbina a vapor. En un ciclo combinado los gases calientes emitidos por una turbina a gas son usados para entregar todo o una parte de la fuente de calor para la caldera, que produce vapor para la turbina a vapor. Puede combinarse una o varias turbinas de gas con una de vapor.

En la figura 2.19 se puede apreciar el nivel de contaminantes que produce una central termoeléctrica equivalente para centrales con los tres tipos de combustibles más utilizados. Para evaluar el potencial contaminador de distintas fuentes se ha creado el concepto de Toneladas equivalentes de Dióxido de Carbono, el cual incluye a todos los gases contaminantes producidos en procesos químicos los cuales son multiplicados por distintos factores que dependen del nivel de peligrosidad y afectación que tienen los diferentes gases contaminantes tanto para la sociedad como para el medioambiente. En

Contaminante	Carbón	Fuelóleo	Gas
Partículas	5	0,8	0,5
Óxidos de azufre	150	60	0,015
Óxidos de nitrógeno	23	25	13
Monóxido de carbono	0,25	0,009	Despreciable
Hidrocarburos	0,5	0,7	Despreciable

**Figura 2.19:** Producción de contaminantes en centrales termoeléctricas MTon/año en una central de 1.000 MW

*Fuente:* Foro Nuclear (2016)

la tabla 2.15 se muestran los factores equivalentes de CO<sub>2</sub> para diversos combustibles utilizados en centrales térmicas.

**Tabla 2.15:** Factores de emisión de CO<sub>2</sub> equivalente por combustible para generación de energía

Categoría	Tipo de Combustible	Combustible	FEC (tC/TJ)
Biomasa	Biomasa	Biogas	30,6
Biomasa	Biomasa	Leña	29,9
Gaseoso	Primario	Gas Natural	15,3
Líquido	Primario	Petroleo Crudo	20
Sólido	Primario	Carbón	25,8
Sólido	Secundario	Coke	25,8

*Fuente:* IPCC 1996

Finalmente se muestran las emisiones por combustible y para cada gas producido en la generación de energía.

### 2.4.3. Efectos de los contaminantes

#### Material Particulado

La exposición a material particulado se reconoce como perjudicial para la salud desde 1940. Los efectos van desde aumento de síntomas respiratorios, hasta asma y enfermedades pulmonares obstructivas crónicas. El material particulado se separa en dos partes, la parte más gruesa de 2,5 a 10 micro metros ingresa al sistema respiratorio penetrando los profundamente en los pulmones y la parte más fina con diámetros

**Tabla 2.16:** Factores de emisión por combustible y gas para generación de energía

Combustible	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	NO <sub>x</sub>	CO	COVNM
Petróleo Crudo	3	0,6	200	15	5
Gas Natural	1	0,1	150	20	5
Carbón	1	1,4	300	20	5
Leña	30	4	100	1000	50
Biogas	30	4	100	1000	50
Diesel	3	0,6	200	15	5
Coke	1	1,4	300	20	5

Fuente: IPPC 1996

inferiores a 2,5 ingresan directamente al torrente sanguíneo llevando las toxinas a todo el cuerpo. Cabe señalar que la fracción fina lo que aumenta el riesgo de mortalidad prematura por efectos cardiopulmonares, en exposiciones de corto y largo plazo. [14] La peligrosidad del material particulado no solo radica en su tamaño, sino que en la composición química que se asocia a la toxicidad. Los sulfatos normalmente están relacionados con los daños mayores, pero estudios recientes demuestran que el material carbonáceo podría tener un mayor efecto. [20]

Por otra parte, la exposición a MP puede tener efectos en la mortalidad de las personas, lo cual se muestra en las figuras 2.20 y 2.21:

Promedio Anual recomendado	MP10	MP2,5	Observaciones
	µg/m <sup>3</sup>	µg/m <sup>3</sup>	
OMS Nivel 1	70	35	A estos niveles se asocia un 15% de aumento en la mortalidad comparado con el valor guía OMS
OMS Nivel 2	50	25	A estos niveles se asocia un 9% de aumento en la mortalidad comparado con el valor guía OMS
OMS Nivel 3	30	15	A estos niveles se asocia entre un 3% de aumento en la mortalidad comparado con el valor guía OMS
Valor guía OMS	<b>20</b>	<b>10</b>	Valores mínimos registrados donde la mortalidad por cáncer al pulmón y enfermedades Cardiopulmonares no presentan un aumento (con un 95% de confiabilidad).

**Figura 2.20:** Efectos sobre la salud frente a la exposición al MP en largo plazo

Fuente: OMS 2005

Promedio diario recomendado	MP10	MP2,5	Observaciones
	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	
OMS Nivel 1	150	75	A estos niveles se asocia un 5% de aumento en la mortalidad diaria comparado con el valor guía OMS
OMS Nivel 2	100	50	A estos niveles se asocia un 2,5% de aumento en la mortalidad diaria comparado con el valor guía OMS
OMS Nivel 3	75	37,5	A estos niveles se asocia entre un 1,2% de aumento en la mortalidad diaria comparado con el valor guía OMS
Valor guía OMS	<b>50</b>	<b>25</b>	Valores mínimos registrados donde la mortalidad diaria por enfermedades Cardiopulmonares y cáncer al pulmón no presentan un aumento (con un 95% de confiabilidad), en base al promedio anual.

**Figura 2.21:** Efectos sobre la salud frente a la exposición al MP en corto plazo

*Fuente:* OMS 2005

### Dióxido de azufre

El SO<sub>2</sub> es un contaminante producido en la combustión de elementos que contienen azufre, tales como carbón y petróleo, capaz de causar daños severos a la salud de las personas, especialmente a ancianos, infantes y asmáticos. (citar texto). Por otra parte exposiciones de la población a una media diaria mayor a 500 mg/m<sup>3</sup> produce un exceso en la mortalidad, exposiciones entre 500 mg/m<sup>3</sup> y 250mg/m<sup>3</sup> genera un aumento en las enfermedades respiratorias agudas y menores a 250 mg/m<sup>3</sup> presenta efectos aumentando los síntomas de las enfermedades respiratorias. <sup>4</sup>

El dióxido de azufre también genera efectos sobre la vegetación, reduciendo la productividad, riqueza y diversidad de las especies en ecosistemas naturales. Estos efectos están asociados tanto a cortas exposiciones y a exposiciones de largo plazo. <sup>5</sup>

### Óxidos de Nitrógeno

Se generan por combustión de elementos que contienen nitrógenos, entre estos encontramos todos los combustibles utilizados en la generación termoeléctricas (carbón, petróleo, gas natural y diésel). La inhalación genera daño al tejido pulmonar, constricción en las viras respiratorios, los efectos más evaluados son el incremento de las admisiones por asma y bronquitis crónica. [21]

<sup>4</sup>Organización Mundial de la Salud, 2005

<sup>5</sup>DS N° 113/01

## Mercurio (Hg)

El mercurio se encuentra como elemento traza en los combustibles fósiles, siendo más significativo su contenido en el carbón, en el que varía entre 0,02 y 1,00 ppm con un promedio de 0,5 ppm. En el diésel el promedio es de 10 ppb. El mercurio particulado posee tiempos de residencia entre 0 y 10 días, pudiendo alcanzar distancias de hasta 500 km desde el punto de descarga. [22]

El mercurio y sus compuestos pueden ingresar al cuerpo a través de la piel y los tractos gastrointestinales y respiratorios. Preferentemente en su forma metálica la principal forma de entrada es respiratoria. Una exposición crónica provoca inflamación de la boca, salivación excesiva, pérdida de los dientes, siendo el más importante el daño a los riñones. [21]

## Níquel

Al igual que el mercurio se encuentra como elemento traza en los combustibles fósiles, siendo más significativo su contenido en el carbón, en el que varía entre 3 y 10.200 ppm con un promedio de 15 ppm. Dependiendo de las concentraciones y tiempos de exposición puede generar el desarrollo de cáncer al pulmón, la laringe y la próstata. Según la USEPA el Níquel puede considerarse como un cancerígeno humano cuando ingresa al organismo vía inhalación. Concentraciones de 0,2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , se asocia a un riesgo de cáncer al pulmón de 1/10000. <sup>6</sup>

### 2.4.4. Zonas Saturadas En Chile

En Chile se definen dos conceptos legales para las zonas de alta concentración de contaminantes, el primero termino que hace referencia a este tipo de zonas es, zona latente, la cual se define como aquélla en que la medición de la concentración de contaminantes en el aire, agua o suelo se sitúa entre el 80 % y el 100 % del valor de la respectiva norma de calidad ambiental. Por otra parte se definen las zonas saturadas como aquellas en que una o más normas de calidad ambiental se encuentran

<sup>6</sup><http://www.epa.gov/mcea/iris/subst/0273.html> doscarinhal

sobrepasadas. <sup>7</sup>

Como se puede apreciar en 2.17 la zona Norte de nuestro país se pueden encontrar 8 zonas declaradas como saturadas, las cuales son por diversos tipos de contaminantes y también por distintas concentraciones, ya sean en corto plazo (Nivel diario o de 24 horas) o concentraciones de largo plazo (Anuales), entre las zonas afectadas encontramos a Huasco, Tocopilla que aparte de ser declaradas como zonas saturadas o latentes también son declaradas como zonas de sacrificio ambiental<sup>8</sup>, esto debido a la presencia de parques industriales que incluyen diversos tipos de industrias contaminantes y centrales térmicas principalmente a carbón que influyen en la contaminación de estas localidades, a las antes mencionadas se debe sumar a la comuna de Mejillones <sup>9</sup> la cual no es considerada zona saturada o latente debido a la presencia de vientos que facilitan la dispersión de contaminantes hacia el océano, pero de igual forma es considerada zona de sacrificio debido a la gran cantidad de contaminantes que emite al ambiente, que de igual forma afectan el ecosistema. Por otro lado encontramos zonas con alta presencia de sector minero como lo son Calama, Chuquicamata y Potrerillos en las cuales su contaminación proviene principalmente de este sector. Las principales fuentes emisoras de MP10 corresponden a las centrales termoeléctricas (Electroandina y Norgener), tratamiento de minerales oxidados (Lipesed), tratamiento de agroquímicos (SQM) y el polvo resuspendido. [23][24] Tocopilla fue declarada Saturada por concentración anual de MP10 en octubre de 2007 <sup>10</sup>. En noviembre de 2007 la resolución N° 2635 da inicio al proceso de elaboración de un Plan de descontaminación.

En la zona de Huasco se emite material particulado y SO<sub>2</sub> asociado a dos centrales termoeléctricas a carbón (Guacolda y Endesa) y la Planta de Pellets de la Compañía Minera del Pacífico. En 1993 se estableció una norma de calidad del aire para material particulado sedimentable en la cuenca del Río Huasco <sup>11</sup>. En el valle del Huasco las concentraciones de SO<sub>2</sub> son bastante inferiores a los valores normados). Para el año

<sup>7</sup>Ley 19.300, Bases del Medio Ambiente

<sup>8</sup>ONG Oceana

<sup>9</sup>ONG Oceana

<sup>10</sup>DS N° 50 de MINSEGPRES

<sup>11</sup>DS /00004/Agric/1992

2008, el promedio tri-anual más alto es cercano a 40 % del valor de la norma, la mayoría de las estaciones presentan concentraciones inferiores al 10 de la norma anual, las cuales disminuyen en la medida que están más distantes de la zona industrial.

**Tabla 2.17:** Zonas Saturadas o Latentes en la zona norte

	Zona	Clasificación	Contaminante	Concentración
Norte	Huasco	Zona Latente	MP 10	Diaria
			MP 10	Anual
	Calama	Zona Saturada	MP 10	Anual
			MP 10	Diaria
	Andacollo	Zona Saturada	MP 10	24 horas
	Tocopilla	Zona Saturada	MP 10	24 horas
				Anual
	Chuquicamata	Zona Saturada	Anhídrido Sulfuroso	24 horas
	Potrerosillos	Zona Saturada	Anhídrido Sulfuroso	24 horas
	María Elena	Zona Saturada	MP 2,5	Anual
Paipote	Zona Saturada	Anhídrido Sulfuroso	Anual	

*Fuente:* Elaboración propia, datos MMA

Según la tabla 2.18 en la Zona Central encontramos grandes urbes contaminadas, como por ejemplo la Región Metropolitana en toda su extensión, el Valle Central de la VI región, la zona de Talca y el Maule, además de Curicó, la contaminación en estas áreas está principalmente dada por el uso de combustibles fósiles en medios de transporte, la presencia de industrias, aunque no de gran tamaño que aportan a la hora de contaminantes y principalmente en las zonas del sur de la Región Metropolitana por el uso de leña como principal combustible para la calefacción de las zonas. Por otra parte, se destaca el complejo industrial que abarca las zonas de Quinteros, Concón y Puchuncaví el cual también es denominado como una zona de sacrificio industrial debido a la alta presencia de contaminantes emitidos por las centrales térmicas, empresas del sector minero, refinerías de combustibles fósiles entre otras. <sup>12</sup>

En la V Región existen seis áreas de monitoreo de calidad de aire asociadas a

<sup>12</sup>Fundación Terram

fuentes emisoras sometidas a regulaciones. Las más importantes, por la magnitud de sus emisiones, corresponden al complejo industrial Ventanas (fundición y refinería de cobre, central termoeléctrica) y a la Fundición Chagres de Anglo American Chile, ambas reguladas por el Decreto 185 (1991). Ventanas cuenta con un Plan de Descontaminación oficial desde 1992 <sup>13</sup>, y gran parte de las comunas de Quintero y Puchuncaví están declaradas como zonas saturadas por SO<sub>2</sub> y MP<sub>10</sub> desde 1993 <sup>14</sup>. La localidad de Chagres, situada en el entorno de la Fundición de Chagres, comuna de Catemu, fue declarada zona latente por SO<sub>2</sub> en el mismo Decreto 185 de 1991.

**Tabla 2.18:** Zonas Saturadas o Latentes en la zona central

	Zona	Clasificación	Contaminante	Concentración
	Curicó	Zona Saturada	MP 2,5	24 horas
	Región Metropolitana	Zona Saturada	MP 2,5	24 horas
	Talca y Maule	Zona Saturada	MP 10	Diaria
			MP 10	Anual
Centro	Valle Central VI región	Zona Saturada	MP 10	Anual
				24 horas
	Ventanas	Zona Saturada	MP 2,5	Anual
			MP 2,5	Diaria
			Anhídrido Sulfuroso	Anual
			Zona Latente	MP 10

*Fuente:* Elaboración propia, datos MMA

Se aprecia en 2.19 que en la zona sur se encuentran 7 zonas declaradas como saturadas o latentes, la mayoría de estas es por la mala ventilación que poseen estas zonas y por el uso de leña como principal combustible de calefacción, se debe notar que al estar más al sur estas necesitan calefacción durante todo el año y no solo en los meses de invierno, como son los casos de Valdivia, Coyhaique, Temuco y Osorno. Por otra parte, en la zona de Temuco destaca la presencia de empresas del rubro forestal que contribuyen a la contaminación a través de la quema de combustibles en sus calderas. En la zona sur también existe una zona de sacrificio ambiental, es la comuna de Coronel que está incluida en la zona saturada del Gran Concepción,

<sup>13</sup>Decreto 252

<sup>14</sup>Decreto 346

esta zona cuenta con la presencia de industria pesquera altamente contaminante, además de centrales térmicas de carbón y otros combustibles fósiles, siendo las más representativas la central Bocamina I y II ambas de carbón, las cuales han estado en constantes disputas legales con los habitantes de la zona debido a la alta contaminación que provocan.<sup>15</sup> Las fuentes emisoras individuales más importantes del Gran Concepción corresponden, en Talcahuano, a las instalaciones de Petrox, Siderúrgica Huachipato, Cementos Bio Bio y un conjunto de industrias petroquímicas y pesqueras; en Coronel, Central Térmica Bocamina y un conjunto de empresas pesqueras; en Laraquete, la Planta de Celulosa Arauco; y hacia el interior del curso del Río Bio Bio las plantas de Celulosa del Pacífico y la industria papelera Inforsa en Laja. [25]

**Tabla 2.19:** Zonas Saturadas o Latentes en la zona sur

	Número	Zona	Clasificación	Contaminante	Concentración
Sur	14	Coyhaique	Zona Saturada	MP 2,5	24 horas
				MP 10	Anual
				MP 10	Diaria
	15	Gran Concepción	Zona Saturada	MP 2,5	Diaria
	16	Los Ángeles	Zona Saturada	MP 2,5 Y MP 10	Diaria
					Diaria
	17	Valdivia	Zona Saturada	MP 10	Diaria
					Anual
	18	Temuco	Zona Saturada	MP 2,5	Diaria
					Diaria
	19	Chillán	Zona Saturada	MP 2,5 Y MP 10	Diaria
			Zona Latente	MP 10	Anual
20	Osorno	Zona Saturada	MP 2,5	Diaria	
				Anual	
				Diaria	
				Anual	

*Fuente:* Elaboración propia, datos MMA

<sup>15</sup>Fundación Terram

## Mejillones

La comuna de Mejillones se encuentra en el norte de Chile, en la región de Antofagasta. Ubicada a 65 km al norte de la ciudad de Antofagasta, tiene una superficie de 3.803 km<sup>2</sup>. Es una comuna que tiene límite con el Océano Pacífico al oeste, por lo cual gran parte de la contaminación ambiental que se refleja en esta comuna afecta directamente al ecosistema marino. La principal Urbe de la comuna es la ciudad de Mejillones que cuenta con una población de 26.931 habitantes, cuenta con un centro de salud al año 2011, específicamente un hospital de los 5 que se encuentran en la región de Antofagasta, en cuanto a educación cuenta con 6 establecimientos, 4 municipales y 2 privados. El desarrollo económico en la comuna viene dado principalmente por la presencia del puerto que se encuentra instalado desde la época en que Chile era un gran exportador de salitre. Las industrias que se han desarrollado mayormente son las que necesitan de la conectividad que entrega el puerto, este auge industrial se da desde la década de los 90, como alternativa a la crisis pesquera de la época. Se instalaron centrales termoeléctricas, fábrica de explosivos Enaex, Interacid (exportadora de ácido sulfúrico y azufre), además de cementos Polpaico. Otro factor que se debe considerar a la hora de la contaminación es la actividad minera y el transporte ferroviario los cuales constituyen el eje del desarrollo industrial de la región. Producto de la actividad de las industrias los efectos negativos son apreciados por la población en el día a día, especialmente la contaminación del aire producto de la actividad de las industrias pesqueras, las cuales también emiten malos olores, esto se ve aumentado por el manejo de ácido sulfúrico en la zona, explosivos, cemento y la producción de energía por parte de las centrales termoeléctricas. Existe evidencia de metales pesados en el fondo marino de la costa, producto del manejo de los productos mencionados anteriormente.<sup>16</sup> De acuerdo a un estudio de la Universidad de Antofagasta del año 2012, en los sedimentos marinos del sector industrial se registran niveles de metales pesados (níquel, cobre, zinc, cadmio, vanadio y plomo) que superan con creces la norma internacional. Además se encontró

<sup>16</sup>[www.No+carbon.cl](http://www.No+carbon.cl): fichas zonas saturadas



**Figura 2.22:** Mapa de Mejillones y ubicación de sus centrales térmicas  
*Fuente:* CNE 2016.



**Figura 2.23:** Mapa de Mejillones y ubicación de sus industrias  
*Fuente:* Universidad de Antofagasta 2012.

contaminación con metales pesados en varias especies de crustáceos y moluscos. [26]

Se destaca en el informe realizado por el CREA de la Universidad de Antofagasta que en el sector aledaño al puerto de Mejillones se presentan altas concentraciones de metales pesados, entre estos Níquel, cobre, zinc, cadmio, vanadio y plomo. Los cuales superan con creces las normativas de referencia internacional, esto debido a que en Chile no se aplican normas en sedimentos marinos. Esto es de suma importancia debido a la presencia de metales pesados en tejidos blandos en los organismos muestreados por el mismo estudio, los cuales entregaron resultados que en varios organismos se supera la norma que impone el Reglamento Sanitario de los Alimentos <sup>17</sup> el cual

<sup>17</sup>Decreto Supremo 977/96

solo permite de 20mg/kg para la sumatoria de zinc, hierro y cobre. En la tabla 2.20 se muestran los valores de concentración de metales obtenidos para las estaciones cercanas a las centrales térmicas y un nivel base ubicado alejado del sector industrial.

**Tabla 2.20:** Concentración de Metales Pesados en la Zona

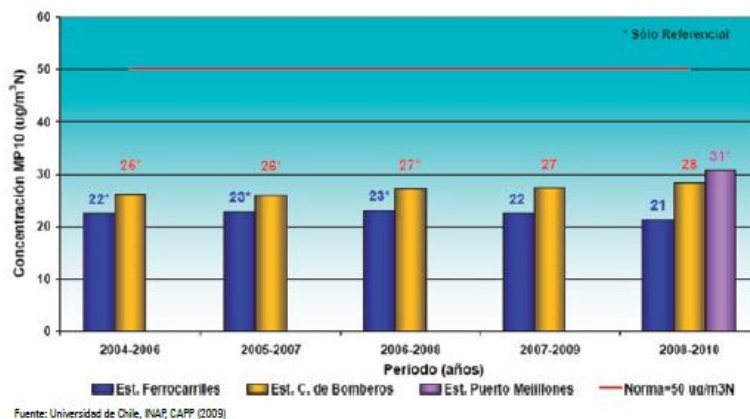
Central Cercana	Estación de Monitoreo	Especie Analizada	V	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Mo	Cd	Hg	As	Se	Tl	Pb
Hornitos	Estación 5	Aulacomya ater (chica)	44	0	3	15	3	18	39	4	22	0	3	1	1	1
		Eurypodius latreillei	15	0	1	18	52	11	23	5	0	0	5	1	22	18
	Estación 3	Glacilaria sp	28	0	3	70	8	4	12	3	1	0	5	1	3	3
Mejillones y Andina	Estación 8	Cancer plebejus y Cancer setosus	14	0	0	20	9	15	35	4	1	0	6	1	1	2
Angamos	Estación 10	Cancer plebejus	21	0	2	28	3	1,5	18	3	2	0	3	1	0	2
	Control	Cancer plebejus y Murcia gaudichaudi	7	0	0	1	3	2,5	16	3	1	1	4	1	1	2
	Norma USA						21	34	150		1					47
	Norma Comercial							10	100				2	0		2

Fuente: Elaboración Propia

De acuerdo con esto varios organismos estarían contaminados con metales pesados, lo cual afecta directamente a la salud de las personas debido a que pueden consumir dichos productos. [26]

Las bajas concentraciones (a pesar de existir fuentes emisoras significativas hacia el Este), se explican en mayor medida por la buena dispersión producto del comportamiento de los vientos, los que siguen una fuerte tendencia en la dirección Norte-Sur (más del 55% del tiempo), con prevalencia por los vientos de dirección Este que presentan una frecuencia menor al 3%. (Estudio impacto ambiental planta GNL) No obstante esta particularidad, en este documento se recomienda la instauración de monitoreo mediante campañas en los sectores de máximo impacto de los distintos proyectos, con el objetivo de resguardar los recursos naturales de la zona afectada por las emisiones de estas empresas. [27] A pesar de los factores mencionados anteriormente la comuna de Mejillones hoy no está declarada como zona latente, mucho menos como zona saturada en cuanto a contaminación, pero es reconocida por distintos organismos e incluso por el Presidente Sebastián Piñera como una “tragedia ambiental”<sup>18</sup>

<sup>18</sup>Discurso 21 de Mayo 2011, Sebastián Piñera



**Figura 2.24:** Mapa de Mejillones y ubicación de sus centrales térmicas  
Fuente: CNE 2016.

## 2.5. Tecnología de Concentración Solar

Las tecnologías de CSP se basan en utilizar espejos para concentrar la radiación solar en un foco, con el fin de elevar la temperatura de un fluido que normalmente es sales fundidas que pueden alcanzar temperaturas sobre 500°C sin dejar el estado líquido. Estas sales serán utilizadas para la generación de electricidad, esto puede ser directa o indirectamente, a través de ciclos de potencia convencionales [28] [29]. Los principales desafíos a la hora de mejorar y seguir desarrollando esta tecnología se basa en los desafíos ingenieriles en cuanto a la fabricación de los materiales, con el fin de mejorar su eficiencia y reducir sus costos. La mayoría de los sistemas de concentración utilizan espejos, esto debido a su alta reflexividad, estos espejos son los encargados de concentrar la radiación de forma puntual para los sistemas de cilindros parabólicos y receptor central y de forma lineal para los sistemas de concentradores de Fresnel. Es importante mencionar que esta energía solo puede captar la radiación solar directa y no la difusa (debido a la imposibilidad de concentrar esta última), aunque la energía concentrada se encuentra entre el 80% y 90% de la energía total que llega a la superficie terrestre. Existen diferencias entre estos tipos de tecnologías, normalmente el factor de concentración es mucho mayor para las tecnologías en que se concentra la radiación de forma puntual, con esto las temperaturas que se pueden alcanzar es mayor que en la concentración lineal. [28] [30] [31] Una de las

ventajas de esta tecnología es que debido a la naturaleza térmica de su proceso se puede hibridar mediante la aplicación de combustibles fósiles o Biomasa, con el fin de evitar el riesgo de paradas o funcionando como reemplazo en el caso de que el sistema solar deba pasar por un proceso de mantenimiento. [31] Según [28] [30] estas tecnologías son económicamente viables solo en localidades con radiación directa incidente superior a los 1900KWh/(m<sup>2</sup>-año). Actualmente existen cuatro tipos de tecnologías las cuales serán descritas posteriormente, pero es importante destacar que las tecnologías que utilizan concentradores de cilindro-parabólicos son las únicas que se consideran suficiente maduras. Esto debido a que cuenta con una experiencia de alrededor de 30 años, debido a una serie de plantas construidas en el Desierto de Mojave (California), esto ha permitido desarrollar esta tecnología hasta el estado en que se encuentra actualmente.

### 2.5.1. Centrales de Receptor Central

Las plantas de receptor central cuentan con 3 elementos principales dentro de su funcionamiento, en primer lugar y el que los diferencia de otras configuraciones es el receptor central, el cual es un intercambiador de calor ubicado a una altura considerable con el fin de evitar efectos de las sombras que puedan disminuir la radiación incidente. Por otra parte se encuentran los heliostatos, estos son una configuración de espejos planos orientados individualmente con el fin de desviar la radiación directa incidente al intercambiador de calor, es importante destacar que cada uno de estos espejos se mueve individualmente con el fin de seguir la trayectoria del sol y así aprovechar de mejor forma la energía total incidente. La tercera parte en cuestión es la torre del receptor central, como lo dice su nombre es una torre que sostiene el receptor a una altura considerable, entre 100 y 200 metros de altura. [32][28]

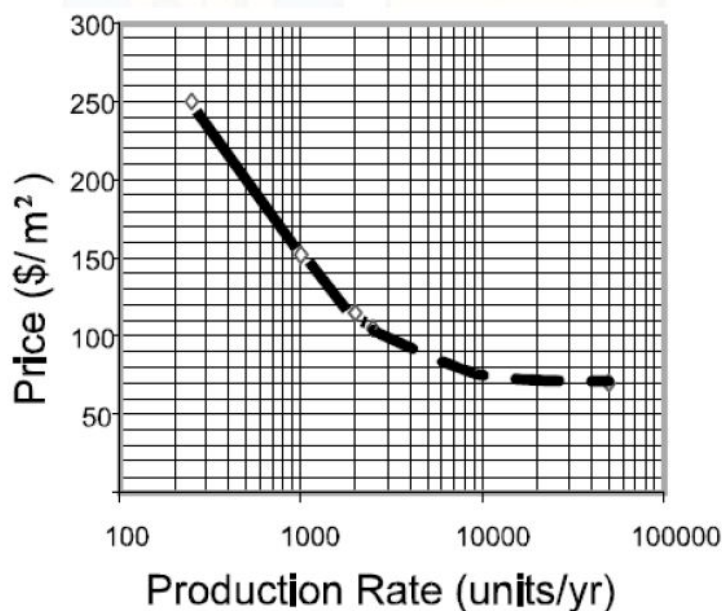
El funcionamiento de esta planta puede poseer variaciones, existen plantas de receptor central en que el fluido calentado en el receptor puede pasar directamente por el ciclo de potencia, por otra parte puede pasar por un sistema híbrido de alimentación y/o puede pasar por un sistema de almacenamiento de energía, siendo esta última

configuración la más óptima debido a que permite el funcionamiento de la planta 24 horas al día.[29][30]

Debido a que este tipo de centrales es la única que se encuentra en construcción en nuestro país será la elegida para evaluar su funcionamiento en las zonas saturadas mencionadas anteriormente, es por esto que recibirá una descripción más detallada que las anteriores con el fin de entender totalmente su funcionamiento.[32][28]

### Campo de Heliostatos

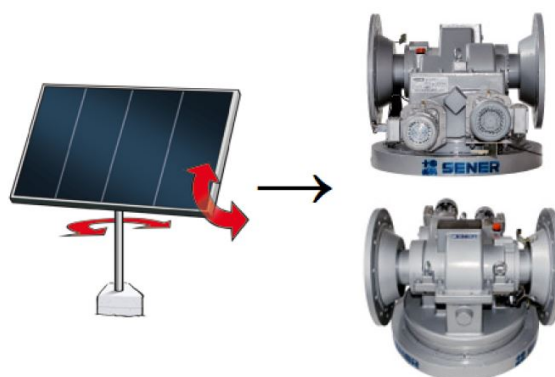
Esta sección de la planta está conformada por los espejos receptores que captan la radiación directa y la dirigen hacia un foco común y los soportes, que incluyen el sistema de seguimiento solar que permiten dirigir y captar la mayor cantidad de energía posible. El campo de heliostatos representa entre un 30% y 50% del costo total de la construcción [33]. Su precio depende de la tasa de construcción anual, por lo que mientras más centrales de este tipo se construyan el precio de los Heliostatos será menor. SolarPaces ha estimado la curva de precio para un heliostato de  $150m^2$ , se obtuvo como resultado el gráfico que se puede apreciar a continuación: [34].



**Figura 2.25:** Precio en dólares de heliostatos de  $150 m^2$  como función del volumen de producción anual.

*Fuente:* SolarPaces

Cada heliostato de la granja solar dispuesta en torno al receptor tiene una superficie reflectante entre 50 y 150 m<sup>2</sup> y generalmente está formado por varios espejos levemente cóncavos agrupados sobre un pilar de soporte. La estructura de soporte permite mantener el heliostato en altura fija que sea suficiente para evitar pérdidas por sombras o bloqueos, considerando el movimiento que estos deben realizar libremente para permitir un adecuado seguimiento solar. Este soporte debe aguantar distintos tipos de cargas, tales como el peso y tamaño del heliostato o el viento incidente en él [33] El sistema de seguimiento solar se sitúa entre la estructura de soporte y el heliostato y por lo general es un elemento electromecánico que, por medio de un sistema de control electrónico central desde la planta, logra seguir los movimientos de elevación y azimut apuntando hacia el receptor central desde cada heliostato . Cabe destacar que desde cada punto del campo el movimiento de este mecanismo debe ser distinto para lograr apuntar en todo momento al receptor. El sistema de control del campo de heliostatos logra una optimización del consumo eléctrico por parte del campo de heliostatos y una distribución óptima del flujo solar incidente en el receptor tomando como datos la posición del sol, la posición de cada heliostato y el modo de operación de cada heliostato. [35]



**Figura 2.26:** Ejes de movimiento de los heliostatos y mecanismo de seguimiento solar.

Existen dos tipos de configuraciones para el campo solar, dependiendo de las zona geográfica en que se disponga la planta se decide cual se usara.

- Campo Norte: En esta disposición todos los heliostatos están ubicados detrás de la torre receptora, el aprovechamiento solar es máximo debido a que se consigue

un mejor ángulo de incidencia, además la construcción del receptor es más simple debido a que solo se debe construir en una cara de la torre.

- **Campo Circular:** En esta disposición la torre receptora se encuentra desplazada hacia el sur del centro de los Heliostatos, mientras que el campo de heliostatos rodea la torre.

Entre más lejos de la línea del Ecuador hacia el norte se tiene una mayor eficiencia óptica anual para una configuración de Campo Norte, en el caso de usar esta configuración se debe aceptar costos de construcción más elevados debido a que la torre receptora a utilizar debe ser mayor. [32]

### **El receptor**

El receptor está compuesto por el sistema de recepción conjuntamente con la torre que lo soporta, la cual es construida de hormigón o de una estructura metálica. Normalmente la altura de la torre esta por sobre los 100 metros de altura. [35]

Por su parte el receptor es el equipo térmico donde se transforma la energía solar en forma de radiación a energía térmica en forma de calor sensible. Las dimensiones de este deben ser las adecuadas para entregar un rendimiento aceptable y distribuir la energía recibida de la manera más homogénea posible, aumentando de esta manera la vida útil del mecanismo [35]. El hecho de que la colección solar se realice de forma óptica, reuniendo la energía de todo el campo en un solo foco, minimiza los requerimientos de transporte de energía térmica, lo cual otorga una ventaja a esta tecnología. [29]

Las tuberías de los que se construyen los receptores son principalmente de acero inoxidable, se debe tomar en cuenta que serán expuesto a muy altas temperaturas, por otra parte los tubos cuentan con un recubrimiento capaz de absorber la mayoría de la radiación recibida (aproximadamente un 90 %) con una muy baja emisividad. [32] [30] Existen diversas disposiciones para las tuberías utilizadas actualmente, las cuales buscan maximizar la energía absorbida por las sales utilizadas para la transferencia de calor y buscan disminuir las pérdidas de calor en el proceso. Actualmente se

desarrollan tres tipos de receptores:

- De Placa: En estos la radiación incide directamente sobre una placa en la cual están adosados los tubos por los cuales circula el fluido.
- Externos: En estos los tubos están directamente expuestos a la radiación.
- Volumétricos: Estos sistemas aún no son utilizados en el mercado, están ideados con el fin de utilizar gas directamente para ser calentado y enfriado en las distintas secciones. No es utilizado debido a diversas dificultades entre las que se encuentra la dificultad a la hora de encontrar materiales que resistan las condiciones de operación de las plantas.

### Sistema de Almacenamiento

El principio de funcionamiento de una CSP es simple, consiste principalmente en almacenar el exceso de calor que se tiene durante el día siendo entregado al material de almacenamiento o mantenido en él. Luego, cuando se requiere energía en los momentos de baja o nula radiación directa, el calor acumulado es entregado para continuar produciendo electricidad [30].

En general, un sistema de almacenamiento de energía térmica incluye un método de colección, un depósito y un medio de almacenaje. Dependiendo de la configuración, el diseño y el tamaño de la planta CSP, el medio de almacenamiento puede ser el fluido de trabajo del ciclo de potencia de la CSP u otro medio que se conecte con el fluido de trabajo a través de un intercambiador de calor. El fluido calentado según los métodos revisados en el apartado anterior y es almacenado intentado minimizar las pérdidas, para luego en algún momento utilizarlo para generar electricidad a través del bloque de potencia [33] [35].

Una de las ventajas que entrega esta tecnología aparte de permitir el funcionamiento de la turbina las 24 horas es que aumenta la eficiencia de la turbina al hacerla trabajar de manera continua en condiciones nominales, reduce el consumo de energía por ciclos de arranque y otorga seguridad energética en cuanto al despacho (segura, predecible y programable), por otra parte el TES (Sistema de almacenamiento de

energía térmica en sus siglas en inglés) permite suavizar la producción de electricidad al eliminar las variaciones de corto plazo que exhiben tecnologías como la PV en los días nublados [36].

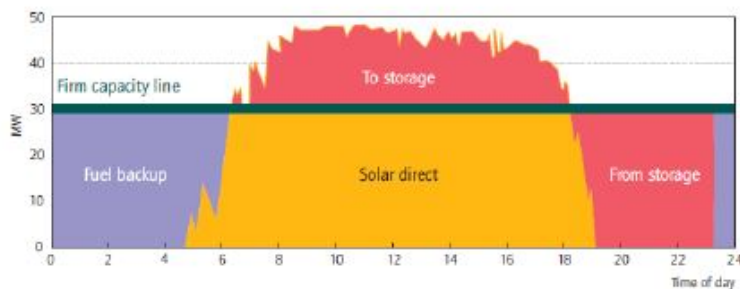
El medio de almacenaje que se busca idear actualmente es uno que posea un bajo costo, con un comportamiento estable a altas temperaturas, que no dañe las tuberías y bombas (y las aspas de la turbina en caso de pasar por ella), medioambientalmente benigno, con un alto calor específico (lo que permite almacenar más calor por unidad de masa), con una alta densidad calorífica por unidad de volumen y que no experimente cambios de fase en el rango de temperaturas en el cual se trabaja. En la actualidad, los HTF más frecuentes en las plantas CSP existentes, o con mayor protección futura, son el agua (vapor), las sales fundidas, aire y el concreto de grafito. El uso en sales fundidas es considerado un medio activo e indirecto de almacenaje de calor. Consiste en una mezcla de sales de nitrato con un punto de fusión a una temperatura adecuada para la operación de la planta, la cual fluye por el circuito primario (receptor a tanques de almacenamiento), intercambiando calor con el circuito secundario entre los tanques de almacenamiento caliente y frío. Sus ventajas por sobre otros HTF son una elevada conductividad térmica, lo que permite utilizar intercambiadores de calor más pequeños, un alto calor específico el cual permite transportar una mayor cantidad de calor por unidad de masa y un elevado punto de fusión, permitiendo almacenar grandes cantidades de calor en un espacio aceptable. Un requisito de esta tecnología es que se debe evitar la solidificación de las sales, por lo que se requiere mayor inversión en aislación de tuberías y tanques además de sistemas de calentamiento de emergencia en los estanques acumuladores.

Existen muchas ventajas de usar sales, una de las más importantes es que eliminan la sensibilidad que tiene el agua o el vapor al paso de las nubes en lo que se refiere capacidad de almacenamiento de calor, además de la imposibilidad de generar vapor sobrecalentado. [32]

Esta solución es la que entrega mejores rendimientos en la actualidad [33].

## Sistema de Hibridación

Un sistema de hibridación es una alternativa de funcionamiento simple que consigue aumentar la disponibilidad y la confiabilidad de la planta de generación. El funcionamiento consiste en alimentar el ciclo de transferencia de calor al gas que hará girar la turbina mediante combustibles fósiles principalmente, también se puede usar biomasa, pero eso dependerá de la disponibilidad del recurso. [35]



**Figura 2.27:** Funcionamiento de una planta con almacenamiento e hibridación.

## Sistema de conversión a la red

Para este tipo de instalación el sistema de conversión de energía para la conexión a la red es el mismo de una central termoeléctrica, por lo que no se considera importante su descripción.

## Evaluación de diseños de planta

Software Computacionales y la Disposición de Heliostatos La disposición de los heliostatos alrededor de la torre central, además de las dimensiones de la torre y el receptor, son comúnmente determinadas por programas computacionales de alta complejidad, tales como SAM (System Advisor Model, desarrollado por NREL), CENSOL (desarrollado por SENER) o NSPOC (Nevada Solar Plants Optimization Code, desarrollado por Nevada Software S.L.), los cuales buscan optimizar la dimensión del campo considerando variables y restricciones económicas (o de costos), técnicas (referentes a la planta) y de la localización (condiciones naturales como la radiación solar, el viento, los niveles de humedad,

recorrido del sol, etc.). Considerando información de un año promedio en la zona se logra integrar efectos tales como las sombras, bloqueos, factores de suciedad, pérdidas por convección en el receptor y efectos de la nubosidad entre otros.[37] [38]

**Múltiplo Solar** Se refiere a el tamaño necesario para alimentar a la turbina a su capacidad de diseño cuando la radiación solar está a su máximo nivel. Las plantas con sistema de almacenamiento de energía deben utilizar múltiplos solares que varían de 3 a 5, con el objetivo de calcular suficiente cantidad de radiación para operar a capacidad plena en condiciones normales y en los momentos en que no se posea acceso a energía solar. [31]

**Capacidad de almacenamiento térmico** Se refiere a la capacidad del sistema de almacenamiento de energía de acumular calor para utilizarlo como medio combustible para los momentos que no se posee acceso a la energía solar. Es importante destacar que este es uno de los factores que se deben entregar a los software de simulación de plantas a la hora de diseñar un sistema de generación de potencia solar. [31]

**Factor de Planta** Es la relación entre la energía real producida por una central generadora en un período dado, y la energía máxima que hubiera producido si se hubiera mantenido siempre a plena carga. Dicho de otro modo, es el cuociente entre la energía generada en un período y el producto entre la potencia máxima y el número de horas del período.<sup>19</sup> Este factor acrecentará su valor aumentando el tamaño del campo de heliostatos, el tamaño de los tanques de almacenamiento, el tamaño de la torre y las dimensiones del receptor central. Estudios económicos muestra que el costo de la energía se reduce hasta un límite de 13 horas de almacenamiento (aproximadamente 65 % de factor de planta). [34]

---

<sup>19</sup>Sitio Web Aes Gener

## 2.6. Tecnología Eólica

La energía Eólica se origina por el movimiento de masas de aire, es una fuente de energía renovable disponible en un potencial significativo a nivel mundial, el suministro de energía se basa en el sol, debido a que el viento se origina por las diferencias de temperaturas entre las distintas geográficas de la tierra. Entre las zonas más favorables para la ubicación de los proyectos eólicos encontramos áreas costeras, llanuras interiores abiertas, valles transversales y zonas montañosas donde existe un gran potencial de viento. Para este tipo de tecnología se usan aerogeneradores que son los equipos que transforman la energía del viento en energía eléctrica, pasando antes por la energía mecánica que logra hacer que los aerogeneradores se muevan. Están compuestos por el rotor con aspas y buje situado en la copa de la torre, una caja multiplicadora, un generador eléctrico y un freno mecánico, además cuenta con un controlador electrónico y un mecanismo de orientación que le permite captar la mayor cantidad de energía disponible. El circuito que recorre la energía es simple, el viento pasa sobre la superficie de las aspas lo que ejerce una fuerza de sustentación que hace girar el rotor, este movimiento es transferido al eje principal y es amplificado mediante una caja multiplicadora que lo lleva hasta la velocidad de rotación de un generador eléctrico. A continuación se entrega una descripción más detallada de cada uno de los componentes necesarios para evaluar un sistema de generación por medio de energía eólica.

### 2.6.1. El Viento

Es el factor más importante de la energía eólica debido a que si no se dispone de este recurso cualquier material utilizado sería inservible a la hora de generar energía. Normalmente se tiene una velocidad promedio mayor en vientos de altamar en comparación con los vientos en la tierra.

## Variabilidad del Viento

El viento es variable tanto temporal como espacialmente, esta variabilidad se tiene en todos los horizontes de tiempo posible, en el corto plazo se pueden encontrar ráfagas de viento y turbulencias que no pueden ser predichas con exactitud, en el corto plazo debido a que existen áreas en las que el viento durante la noche es menor que durante el día y durante las distintas estaciones del año. Por otra parte el viento también varía con respecto a la altura en la que sea medido, esto puede ser apreciado en los exploradores de viento disponibles. <sup>20</sup>

La distribución de velocidades del viento, es decir, la frecuencia de ocurrencia del viento en varios rangos de velocidad, tienden a ser similar anualmente. La forma general de distribución es también similar de un lugar a otro, incluso si los promedios son diferentes. En la mayoría de los casos de interés energético, la distribución de probabilidad de la velocidad del viento sigue aproximadamente la función de densidad  $p(v)$  de probabilidad de Weibull, la cual tiene la siguiente forma:

$$p(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \cdot \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (2.1)$$

Donde:

- $v$ : velocidad del viento medida a la altura del buje del generador (m/s).
- $p(v)$ : función de densidad de probabilidad de Weibull.
- $c$ : factor de escala (m/s), valor próximo a la velocidad media anual.
- $k$ : factor de forma que caracteriza la asimetría o sesgo de la función  $p(v)$ .

Existe otra forma de representar la dirección e intensidad de los vientos, esta forma gráfica es la rosa de los vientos, la cual está dada por una circunferencia que indica todas las direcciones posibles de los vientos, las velocidades de los vientos vienen

<sup>20</sup><http://walker.dgf.uchile.cl/Explorador/Eolico2/>

dadas según los colores que sean utilizados para crearla, normalmente colores más oscuros son asignados a intensidades de viento mayores y el nivel de concentración de los vientos o el % de participación de estos en el total de ocurrencias está medido por un eje ubicado en la sección izquierda de la circunferencia.

### 2.6.2. Cimentaciones

Según el tipo de parque eólico que se va a construir se debe tener en cuenta la superficie del lecho marino, para esto se deben hacer estudios geológicos y geotécnicos.

#### Lecho Marino

Para realizar el estudio del lecho marino un primer acercamiento es un estudio geológico, el cual nos entregará la morfología del fondo marino. Con este tipo de estudio solo se obtiene un resultado parcial, el que deberá ser luego complementado con estudios geotécnicos más avanzados, pero para una primera inspección sobre la factibilidad de la implementación de una central este estudio es suficiente. Existen dos tipos de sistemas para realizar este estudio:

**Perfilador Sísmico** Es un sistema de exploración geofísica basado en la reflexión vertical, en el cual interviene una fuente de ondas acústicas y varios receptores de estas. El funcionamiento es bombardear el fondo marino con este tipo de ondas las cuales según la forma y el tiempo en que se reciben muestran la forma que tiene el sub-suelo marino, es importante destacar que este tipo de estudio permite discriminar entre las distintas capas de materiales del fondo marino.

**Sonar de Barrido Lateral** Permite revelar anomalías que sobresalen del fondo marino, dependiendo del tamaño de estas puede abarcar hasta 200 m a la redonda, es posible encontrar naufragios, tuberías y rocas de distinto tamaño utilizando este sistema.

Posteriormente se realizan estudios geotécnicos que permiten obtener conocimiento detallado de la morfología del lugar donde se instalará la planta, con esto se puede

diseñar correctamente las estructuras de soporte y su proceso de instalación. Para construir la estructura de una central eólica off shore se deben considerar diversos factores que no son los mismos que afectan en tierra, en este caso se debe considerar el efecto del oleaje, la corrosión y las corrientes marinas presentes. En este punto la transmisión de la energía generada a la superficie terrestre toma un valor importante, debido a que debe ser un sistema con una confiabilidad muy cercana al 100 % y tener la menor pérdida posible. A continuación se mencionan los tipos más importantes de cimentaciones en el lecho marino:

**Monopilote** Se utiliza para profundidades inferiores a los 30 m, el pilote normalmente tiene un diámetro no mayor a 5 m y debe ser enterrado 10 m a 20 m en el suelo marino.

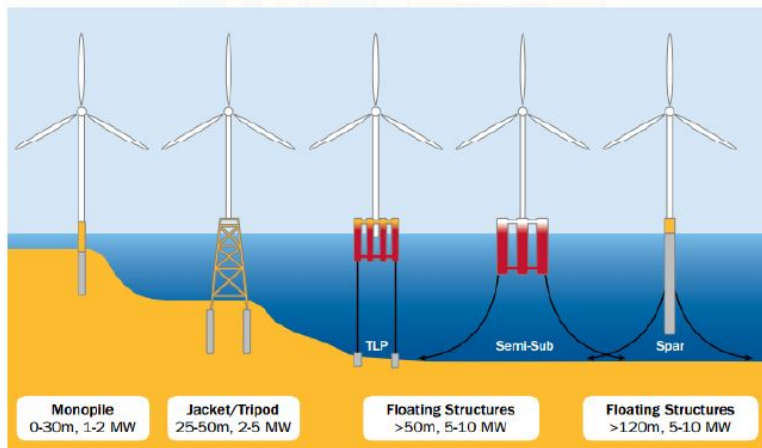
**Trípode** Es utilizando para profundidades que van desde los 30 m a 60 m, se utiliza frecuentemente para la extracción de petróleo y gas. Es rígida y versátil, requiere poco acondicionamiento del lecho marino, pero no es recomendada para lechos con grandes rocas.

**Jacket** Se utiliza en profundidades entre 25 m y 50 m, consta de una estructura de 4 piernas conectadas con tirantes, la producción de este tipo de estructuras es en serie, por lo tanto en cuanto a precio es más competitivo que los anteriores.

**Base de Gravedad** Se utiliza para profundidades inferiores a los 10 m, tiene una forma similar a la utilizada en parques eólicos terrestres, se construyen normalmente de acero o concreto.

**Flotante** Se utiliza para profundidades superiores a los 100 m, es una plataforma flotante que mantiene su lugar por amarras, tiene un menor coste que las anteriores debido a que no se debe perforar el lecho marino. Pero cuenta con la desventaja de no ser rígida por lo que queda más expuesta a las condiciones marinas.

Se puede apreciar en [2.29](#) que las estructuras más utilizadas son para las profundidades inferiores a los 30 m, lo cual entrega seguridad en cuanto a que la tecnología



**Figura 2.28:** Potencia y profundidad recomendada para cada cimentación

Fuente: [40]

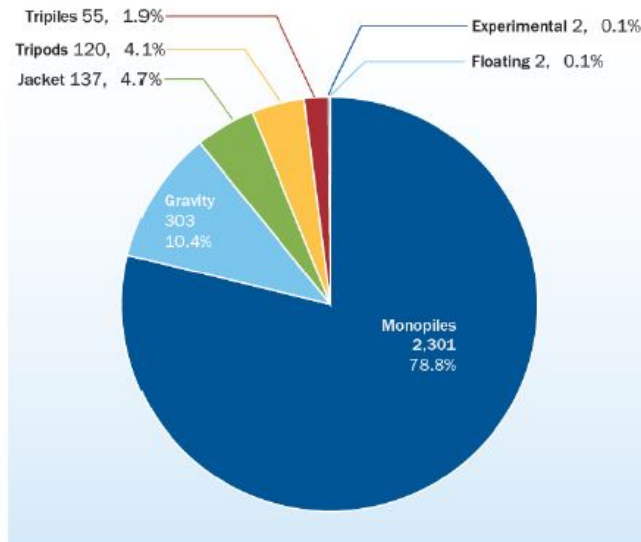
ya ha sido probada y su elaboración es en serie. Aunque se debe tener en cuenta que la tendencia del mercado apunta al desarrollo de las estructuras flotantes[40]

### Cimientos en Tierra

Generalmente es una estructura de hormigón armado, las dimensiones de este va a depender del tamaño del aerogenerador y la estructura del suelo, como referencia se tiene que para un aerogenerador de 1,5 MW se tiene una estructura de 10m x 10m x 3m. Existen dos tipos de cimientos, uno circular que utiliza menos material y tiene una distribución de fuerzas uniforme y uno cuadrado el cual utiliza mayor material, pero tiene una construcción más simple.

### 2.6.3. Aerogeneradores

Es la pieza más importante dentro de la estructura de una central de generación eólica, este es el elemento encargado de transformar la energía cinética del viento en energía mecánica. Es importante destacar que no toda la energía cinética del viento es tomada por el aerogenerador, debido a que existe una porción que sigue en el aire, es por esto que el viento continua luego de haber pasado por el aerogenerador, por otra parte existe una pérdida de energía debido a los roces entre el aire y el rotor, es por esto que el diseño del aerogenerador tiene una vital importancia a la hora de



**Figura 2.29:** Cimentaciones instaladas según tipo tecnología, hasta el 2014

*Fuente:* [40]



**Figura 2.30:** Soporte utilizado en aerogeneradores onshore

*Fuente:* [41]

aumentar su efectividad, también deben considerarse ciertos roces mecánicos entre las piezas que conforman el sistema del aerogenerador. En el eje del rotor se obtiene una potencia ( $P$ ) capaz de accionar una carga, como un alternador eléctrico o una bomba hidráulica. Este potencia ( $P$ ) se conoce como potencia en el eje del rotor o potencia al freno de la misma forma que en cualquier otro tipo de motor (turbina de gas, de vapor o motor de combustión interna). La potencia eólica del viento antes de incidir sobre el rotor se conoce como potencia eólica disponible ( $P_d$ ). Su relación con la potencia en el eje ( $P$ ) se establece a través de un rendimiento de conversión o coeficiente de potencia ( $C_p$ ) definido como la relación entre la potencia en el eje y la disponible del viento según:

$$C_p = \frac{P}{P_d} = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho Av^3} \quad (2.2)$$

$C_p$  depende del tipo de rotor, su velocidad de giro y la velocidad del viento disponible.

Por lo tanto se puede definir:

$$P = \frac{1}{2}\rho Av^3 \quad (2.3)$$

- P: Potencia en el eje del rotor del generador (W)
- A: Área barrida por el rotor del generador ( $m^2$ )
- $\rho$ : Densidad del aire en las condiciones de presión y temperatura del viento ( $kg/m^3$ )
- v: Velocidad del viento medida a la altura del buje del generador (m/s)
- $C_p$ : Coeficiente de potencia.

Por otra parte el  $C_p$  es función de la velocidad específica  $\lambda$ , que es la relación entre la velocidad lineal en el extremo de la pala del generador y la velocidad del viento (v), el cual está dado por:

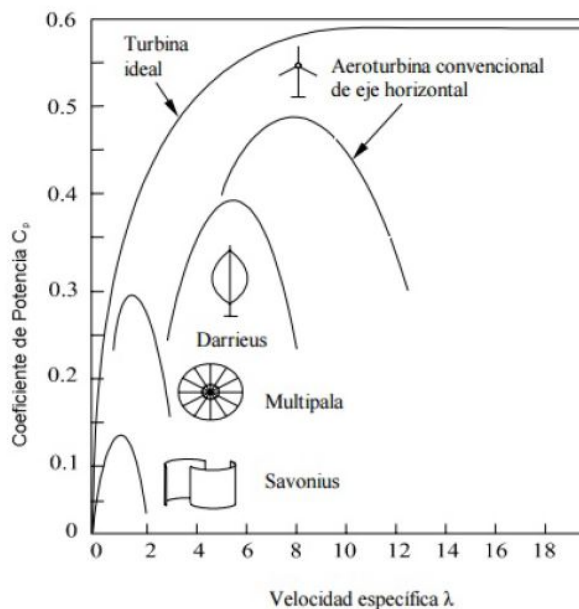
$$\lambda = \frac{u}{v} = \frac{\omega R}{v} = \frac{2\pi n R}{60v} \quad (2.4)$$

Donde:

- u: Velocidad lineal del extremo de la pala del rotor del generador (m/s)
- $\omega$ : Velocidad de rotación del rotor del generador (rad/s)
- n: Velocidad de rotación del rotor del generador (rpm)

- R: Radio del motor (m)
- v: Velocidad del viento medida a la altura del buje del generador (m/s)

En 2.31 se aprecia los valores del coeficiente de potencia en función de la velocidad para distintos tipos de aerogeneradores.



**Figura 2.31:** Variación del coeficiente de potencia ( $C_p$ ) frente a la velocidad específica  $\lambda$  para distintos tipos de aerogeneradores

Fuente: [39], pp 133

Los materiales a utilizar en la construcción de los aerogeneradores son muy diversos, a lo largo de la historia se han utilizado desde madera hasta telas, actualmente se utilizan distintas composiciones de materiales, entre los más destacados se encuentran combinaciones entre fibras de vidrio, carbono y kevlar, además de resinas de poliéster, vinil éster y epoxi. La ventaja de utilizar composiciones de materiales es que se pueden direccionar las cargas hacia los puntos apropiados y además se puede reducir el peso total del aerogenerador.

En el gráfico (citar) se puede apreciar la curva de generación de un aerogenerador, en esta curva se aprecian dos puntos importantes, el primero es la velocidad de conexión que es el punto en el cual los aerogeneradores están diseñados para girar,

este punto se encuentra entre los 3-5 m/s y la velocidad de corte, esta velocidad se utiliza para dejar sin funcionamiento los aerogeneradores con el fin de evitar posibles daños en la turbina o en las zonas que poseen contactos mecánicos.

## 2.7. Tecnología Fotovoltaica

Los módulos fotovoltaicos (PV) son dispositivos de estado sólido que convierten la luz solar, la fuente de energía más abundante en el planeta, directamente en electricidad sin un otro dispositivo de transformación de energía, como un motor a pistones o giratorio. Los equipos PV no tienen partes móviles y, como consecuencia, requieren un mínimo de mantenimiento. Por otra parte, se genera electricidad sin producir emisiones de contaminantes u otros gases y su funcionamiento es prácticamente silencioso. Los sistemas fotovoltaicos se pueden construir en cualquier tamaño, desde miliwatts (mW) hasta megawatts (MW), además son sistemas modulares, es decir, se pueden agregar fácilmente más paneles para aumentar su producción. [42]

Un generador PV es principalmente un conjunto de celdas solares, conexiones, piezas de protección y apoyo. Las celdas solares están hechas de materiales semiconductores, generalmente de silicio, y son especialmente tratados para formar un campo eléctrico positivo en un lado (lado posterior) y negativo en el otro lado (frente al Sol). Cuando la energía solar (fotones) llegan a la celda solar, los electrones son golpeados y sacados de los átomos en el material semiconductor. Si los semiconductores eléctricos están unidos a los lados positivo y negativo, se forma un circuito eléctrico, los electrones son capturados en la forma de corriente eléctrica, llamada fotocorriente. [43]

### 2.7.1. Elementos que Constituyen una Instalación

Un sistema completo de generación eléctrica a partir de módulo solares debe poseer, además de las celdas solares, diversos componentes que sirven para transformar, almacenar y transportar la energía de manera correcta para la necesidad impuesta. Dentro de los componentes se pueden destacar:

- Arreglo de baterías: Dependiendo de la necesidad energética será necesaria la instalación de un arreglo de baterías para almacenar la energía que no se consume durante el día y que puede ser utilizada en la noche o en momentos de alta demanda energética.
- Sensores de control: Es necesario mantener un control constante en todos los componentes instalados, ya que será la herramienta con la que se determinará el almacenamiento de energía, uso de baterías en caso de sobre demanda de energía y además se puede mantener el control sobre el sistema por completo, con lo que se pueden disminuir las mantenciones reactivas del sistema que impactan de manera considerable en el costo de operación y mantenimiento.
- Inversores y rectificadores de corriente eléctrica: Son necesarios para transformar la corriente directa (DC) a corriente alterna (AC) o viceversa, en caso de ser necesaria. Un inversor viene especificado por su tensión nominal de entrada, su potencia nominal y el tipo de señal que genera. Los principales parámetros que les caracterizan son los siguientes:
  - Eficiencia del inversor: es un parámetro de gran importancia ya que indica cómo se comporta éste elemento en rangos de potencia diferentes al nominal.
  - Capacidad de sobrecarga del inversor: Se trata de la capacidad del mismo para manejar potencias bastante superiores a la nominal.
  - La Distorsión Armónica: nos marca la relación entre la potencia debida a los armónicos (ondas de tensión) con frecuencia superior a la fundamental y la debida a los armónicos fundamentales.
  - El Factor de Potencia: desfase entre tensión y corriente.
  - Funcionamiento en espera o de bajo consumo: en este modo el inversor detecta que no hay ninguna carga conectada y reduce su autoconsumo al mínimo.

La misión del inversor es ser capaz de extraer del campo fotovoltaico la mayor cantidad de energía posible y además, como ya se ha dicho antes, adecuar la misma a las condiciones de la red. Para ello “sigue” el punto de máxima potencia de los módulos fotovoltaicos. Es decir, le impone al campo fotovoltaico un valor de la tensión  $V$  que se aproxime al valor de  $V_{mp}$  de forma que se genere una intensidad  $I$ , lo más próxima a la  $I_{mp}$  para la irradiancia existente. Los inversores deben tener una separación galvánica y estar protegidos contra inversión de la polaridad en la entrada, cortocircuito y sobrecarga a la salida.

- Generadores a combustibles fósiles: Estos se instalan generalmente en sistemas aislados y sirven para respaldar el uso del sistema solar y además disminuye el costo de instalación de baterías, ya que aumentan la disponibilidad del sistema eléctrico.
- Estructura: Es necesario contar con una estructura de sujeción de sistema solar y fundaciones civiles para el correcto uso del sistema solar y todos los componentes necesarios. [44]

### 2.7.2. Tipos de Módulos Fotovoltaicos

Los módulos fotovoltaicos se pueden clasificar según el tipo de célula con que se fabriquen. Así mismo las células solares se clasifican según el tipo de material semiconductor que las constituye y según su estructura interna.

- Silicio monocristalino: Es el material más utilizado actualmente para la fabricación de células solares. Su mayor inconveniente es lo costoso que resulta el proceso de fabricación, debido a su elevada pureza y la gran cantidad de material activo empleado. Su gran ventaja es la eficiencia, la cual es notablemente superior al resto de los tipos. Las células monocristalinas pueden conseguir un rendimiento de aproximadamente un 19% en laboratorio y entre un 10 y un 13% en condiciones reales de funcionamiento. El silicio monocristalino se purifica y se funde consiguiendo un lingote redondo de monocristal de silicio.

Posteriormente se corta en finas obleas, cuadradas o en forma de octógonos irregulares, para conseguir células individuales.

- **Silicio policristalino:** Las células policristalinas de silicio proceden del corte de un bloque de silicio que se ha dejado solidificar en un crisol y que está formado por muchos pequeños cristales de silicio. Este tipo de elaboración es mucho menos costosa que la del silicio monocristalino, por lo que las células tienen un costo más bajo que las anteriores. Este proceso de fabricación da lugar generalmente a un rendimiento algo más bajo debido a que presentan un peor comportamiento a altas temperaturas. Las células policristalinas pueden conseguir un rendimiento del 18 % en laboratorio y entre un 10 y un 12 % en condiciones reales de funcionamiento. La superficie de células policristalinas se diferencia de las monocristalinas en que tiene zonas de colores diferentes en vez del color uniforme de las células monocristalinas.
- **Capa Delgada:** Un caso particular de las células de silicio cristalino, es la tecnología conocida como “capa delgada” la cual está desarrollándose por algunos fabricantes, con un futuro prometedor. El funcionamiento eléctrico es el mismo que el del silicio mono y policristalino, pero la elaboración es completamente diferente.
- **Silicio amorfo:** Es diferente de los otros tres tipos anteriores, el silicio amorfo no tiene ninguna estructura cristalina. Las células de silicio amorfo se desarrollan como tecnología de capa delgada. El silicio amorfo procede del gas silano ( $\text{SiH}_4$ ) y está formada por capas delgadas sucesivas depositadas al vacío sobre un material: plásticos, cristal, metales, etc. Su proceso es similar a un pintado. Lo que se obtiene no son células individuales sino una lámina continua. El proceso de fabricación está integrado en el de obtención de la lámina. Cabe destacar la ausencia de soldaduras para realizar el conexionado. Las células de silicio amorfo tienen una eficiencia considerablemente menor que las de silicio cristalino, debido generalmente a la mala calidad del producto utilizado. Una célula de silicio amorfo del mismo tamaño que una cristalina genera una potencia

en torno al 60 % menor que la segunda. Además sufre bastante degradación o disminución de su eficiencia tras una prolongada exposición a los rayos solares.

[44]

## 2.8. Costos de las ERNC

### 2.8.1. Costos Parque Eólicos

Según la agencia internacional de energías renovables (IRENA) [45] Los costos tanto de generación como de instalación de energía eólica han ido disminuyendo en los últimos años, esto debido a que cada vez existe más demanda de productos relacionados a este tipo de energía, lo cual hace que los procesos de producción generen economías de escalas, además de aprovechar las curvas de aprendizajes obtenidas de las experiencias anteriores tanto en la fabricación de productos como en la construcción de plantas. Como se puede observar en la tabla 2.21 el costo de la instalación de energía eólica Off Shore ha bajado entre un 9 % y 27 % para la tecnología Off Shore llegando a tener valores promedios de entre 2700 y 5070 USD/KW instalado. Para la energía eólica On Shore que siempre ha tenido un costo menor debido a que la instalación en tierra es mucho más simple se tiene un descenso del costo de entre un 4 % y un 25 %, lo cual nos entrega costos de instalación al año 2014 de entre 1280 y 2290 USD/KW de energía instalado. Por otra parte los costos de mantención y funcionamiento de este tipo de plantas se encuentran actualmente en 0.10-0,21 USD/KWh para la tecnología OffShore y entre 0,06 y 0,12 USD/KWh para la tecnología en la superficie terrestre.

En la tabla 2.22 se puede apreciar la participación de los costos según la tecnología a instalar, existe una diferencia notable entre la participación de las turbinas para cada una de las instalaciones, esto debido a que se tienen costos notablemente más elevados en la tecnología OffShore.

En la figura 2.32 se puede apreciar el costo de instalación de centrales OnShore para distintos países y su evolución en el tiempo es importante destacar que se aprecia

**Tabla 2.21:** Evolución de los Costos de Instalación y Generación Energía Eólica

	2013		2014	
	Off Shore	OnShore	Off Shore	OnShore
Costo de Instalación Promedio (USD/KW)	2700-6530	1340-2330	2700-50701	1280-2290
Costo de Producción Promedio (USD/KWh)	0,13-0,20	0,06-0,12	0,10-0,21	0,06-0,12

Fuente:Elaboración propia con datos de [45]

**Tabla 2.22:** Participación de Costo Según Tecnología

Tipo de Costo	OnShore (%)	OffShore (%)
Turbinas	64-84	30-50
Conexión	9-14	15-30
Contrucción	4-10	15-25
Otros	4-10	8-30

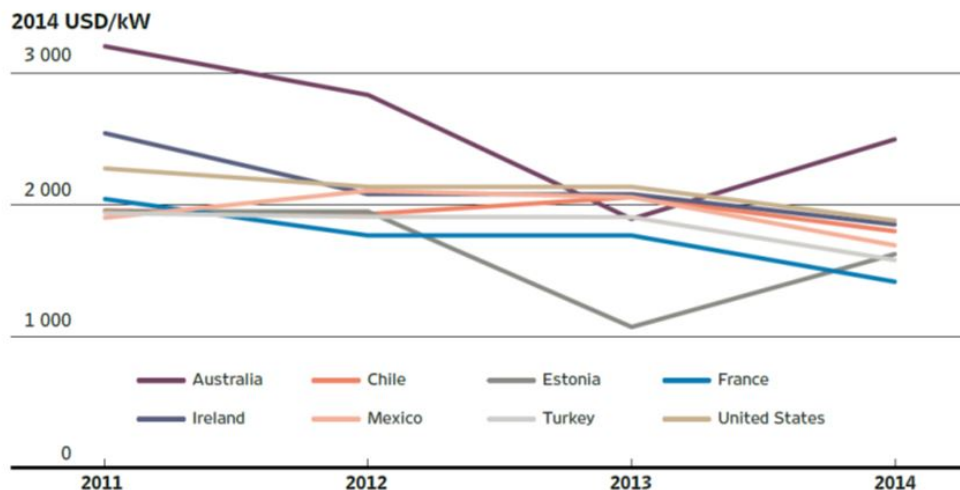
Fuente:Elaboración propia con datos de [45]

la curva de costos en Chile, la cual ronda los 2000 USD/KW durante el período 2011-2013 y en el año 2014 tiene un descenso hacia los 1800-1900 USD/KW:

Los costos de mantención y funcionamiento de las plantas de energía eólica se estiman entre 0,02 y 0,03 USD/KWh para el tipo de tecnología OnShore, en tanto para los parques eólicos ubicados sobre superficie marina los costos se estiman considerablemente superiores, los que llegan a alcanzar valores dentro del rango de los 0,027 a 0,054 USD/KWh. [46]

### 2.8.2. Energía Solar Fotovoltaica

Si para el año 2010 existían 39 GW de potencia fotovoltaica instalada para el año 2014 esa cifra aumentó en casi 4 veces, llegando a cifras cercanas a los 180 GW. Esto se debe principalmente a la reducción de costos que viene asociada a el desarrollo de nuevas tecnologías de producción, el aumento de la demanda de insumos lo cual genera economías de escala en la producción y curvas de aprendizaje las cuales aún presentan potencial por desarrollar. En cuanto a los costos de instalación y operación



**Figura 2.32:** Evolución de Costos de Instalación de Centrales Onshore para Distintos Países

*Fuente:* [45].

de este tipo de energía estos han disminuidos de forma notable, si en el año 2010 instalar 1 KW de energía solar fotovoltaica tenía un costo que iba entre los 3700-7060 USD para el año 2014 estos márgenes han disminuido notablemente, el nuevo rango va entre los 1570-4340 USD/KW esto demuestra un costo de más del 50 % para el límite inferior del rango y levemente inferior al 40 % para la central con mayores costos de instalación. Por otra parte los costos de producción de energía también han tenido un descenso sustancial, si en el año 2010 los costos iban desde 0.23 a 0.5 USD/KWh ahora se han reducido en más de la mitad, hasta los 0.11-0.28 USD/KWh de energía generada, es importante destacar que los costos de operación dependen directamente de la calidad del recurso solar que se posea, por lo tanto en zonas con gran potencial solar este costo puede ser estar en el límite inferior.

**Tabla 2.23:** Evolución de Costos de Instalación y Operación para Centrales PV

	2010	2013	2014
Costo Medio Instalación Centrales Superiores a 20 MW (USD/KW)	3700-7060	1690-4250	1570-4340
Costo de Producción de Energía Centrales Superiores a 20 MW (USD/MW)	23-50	12-24	11-28

*Fuente:*Elaboración Propia con datos de [45]

### 2.8.3. Costos Centrales de Potencia Solar

Las centrales de potencia solar son una tecnología reciente y que aún está en vías de desarrollo, según datos de [45] para el año 2010 la capacidad instalada era de 1,3 GW, aumentando para finales del año 2014 a 4.8 GW. Por lo que se espera que los costos asociados a esta tecnología aún sean muy superiores a las anteriormente nombradas, aunque presenta una ventaja sustancial frente a todas las ERNC que no necesitan de combustión y es la continuidad de la generación de la energía. Para el año 2013 el costo de instalación de este tipo de centrales iba entre los 3550-8760 (USD/KW), el cual es muy superior a los costos antes mencionados, en cuanto a los costos de operación y mantenimiento para el año 2014 los rangos están dados por 0.20-0.35 (USD/KWh), el cual representa 1.5 veces el costo de la energía fotovoltaica.

**Tabla 2.24:** Evolución de Costos de Instalación y Operación para Centrales de Potencia Solar

	2010	2013	2014
Rango de Costo Total de Instalación (USD/KW)	3240-11740	3550-8760	Sin Datos
Rango de Costo de Operación (USD/KWH)	0,33-0,44	0,19-0,39	0,20-0,35

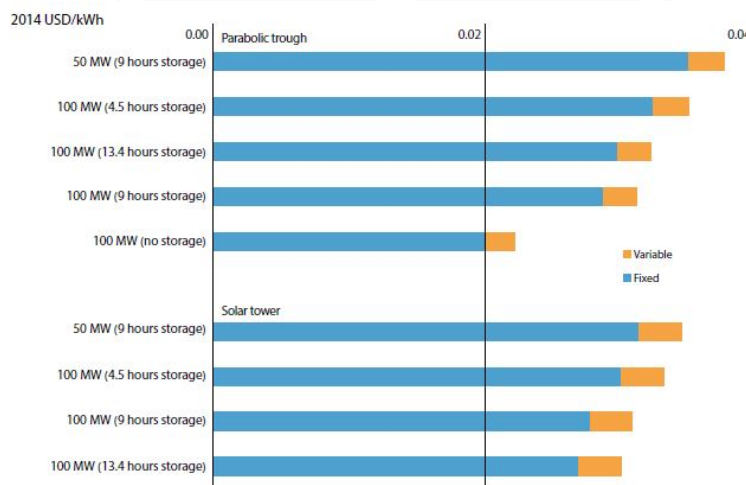
*Fuente:*Elaboración Propia con datos de [45]

En la tabla 2.25 se pueden apreciar distintos costos de instalación para diversos tipos de plantas de potencia solar, es importante destacar que todas estas plantas son de Torre y tienen la capacidad de funcionar durante las 24 horas del día. En la 2.33 se puede apreciar los costos de operación y mantenimiento para diversos tipos de plantas, se aprecia que existe una disminución del costo de a medida que las plantas poseen un mayor tiempo de acumulación, esto se debe a que puede funcionar mayor cantidad de tiempo con las reservas de calor acumuladas.

**Tabla 2.25:** Costos Actuales de Centrales de Potencia Solar Según Capacidad de Almacenamiento y HTF

Fluido	Multiplo Solar	Alm. (Hrs)	Factor de Planta	Costo (USD/KW)
Sales Fundidas		7,5		7825
Sales Fundidas	1,8	6	43 %	6772
Sales Fundidas	2,1	9	46 %	7983
Sales Fundidas	1,8	6	48 %	8025
Sales Fundidas	2	9	54 %	8299
	3	12	68 %	9742
	3	15	79 %	11311

Fuente:Elaboración Propia con datos de [45]

**Figura 2.33:** Costo de Operación y Mantenimiento para Distintos Tipos de CSP

Fuente: [45]

## 2.9. Evaluación Multicriterio

La metodología de evaluación multi-criterio es capaz de combinar distintas dimensiones en las que se ve envuelto un proceso de toma de decisiones, una de las características más importantes es la cantidad y diversidad de factores que se logran integrar en los procesos de evaluación. El principal objetivo es transformar las mediciones, percepciones y evaluaciones de cada uno de los criterios en una escala única, con esto los elementos pueden ser comparados y a través de esto se establecen

prioridades a la hora de tomar decisiones. Una de las metodologías multicriterio más utilizadas, con fundamentos matemáticos, es el Proceso Analítico Jerárquico (Analytic Hierarchy Process: AHP).

La evaluación multi-criterio comprende un conjunto de teorías, modelos y herramientas de apoyo a la toma de decisiones aplicable a una amplia gama de proyectos, tanto en la inversión privada como pública, incluso en la selección de tecnologías comparando dos o más alternativas.

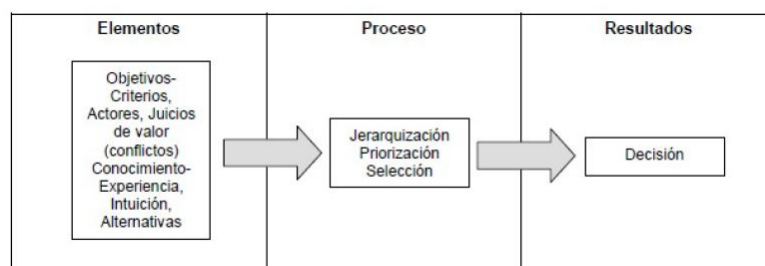
La forma más común de evaluar los proyectos actualmente es mediante los métodos económicos, específicamente el VAN, se busca cuantificar la mayoría de los efectos posibles en este análisis, pero existen una gran cantidad de impactos que no son cuantificables hasta ahora, es por esto que se deben incluir nuevos factores a la hora de tomar decisiones.

Las formas más comunes de evaluar impactos en un proyecto son las siguientes:

- **Modelo Costo-Efectividad:** Corresponde a la evaluación de diferentes alternativas de inversión, con el fin de comparar éstas sobre la base de objetivos y criterios ya definidos. De esta forma se podría considerar como un subconjunto de un análisis costo-beneficio en el que los costos, más no los beneficios se calculan en términos monetarios.
- **Modelo Costo-Beneficio:** Es una herramienta que consiste en la comparación de los costos (de inversión y operación) de un proyecto con los beneficios que éste genera. Este modelo es una herramienta para la toma de decisiones o proceso al que se someten las alternativas de inversión, el que por medio de la aplicación de determinados criterios permite emitir un juicio sobre la conveniencia de la implementación de cada una de ellas. Los criterios de evaluación quedan subordinados a los objetivos que se persigan con cada proyecto, valores y limitaciones impuestas por la entidad evaluadora y las restricciones legales; esto da origen a diferentes tipos de evaluaciones de proyectos. La práctica de la evaluación social de proyectos en Chile, ha estado centrada en la evaluación costo beneficio bajo el enfoque de eficiencia, y en bienes y servicios en los que

existen mercados observables. Sin embargo, uno de los riesgos que se corre con el uso de este método es que la tendencia a cuantificar los efectos sobre enfatice aquéllos que son valorizables, aun cuando otros efectos intangibles no cuantificados pueden ser tanto o más importantes. No obstante, a pesar de su historial de altibajos el análisis costo beneficio es actualmente la principal herramienta para la evaluación económica de programas y proyectos públicos, en cualquiera de sus fases, tales como proyectos mejoramientos de puertos, desarrollo urbano, vías férreas, autopistas y caminos, etc.

- Modelo No Económico - Técnicas de Decisión Multi-criterio: Este proceso de decisión implica, necesariamente, la comparación entre las alternativas sobre las que se puede optar frente a cierta disyuntiva presente, en primer lugar se hace necesario separar un problema de decisión en los elementos que lo componen, para la posterior comparación entre ellos, de esta manera la toma de decisión implica el hecho de comparar elementos que se traduce en la necesidad de realizar mediciones que permitan aplicar los criterios de comparación para establecer preferencias entre ellos, es decir, una jerarquía.



**Figura 2.34:** Estructura Evaluación Multi-criterio

*Fuente:* [47]

Para la correcta utilización del método lo principal es definir los elementos que serán evaluados, en esta parte se incluyen tanto objetivos como efectos de la evaluación del proyecto. Por otra parte se debe realizar un jerarquización de estos elementos seleccionados, a través de esto se prioriza por cuales tienen una mayor ponderación a la hora de decidir sobre el proyecto final. Finalmente y considerando todos los factores se puede establecer una decisión correcta. En la figura 2.34 se puede apreciar un

breve esquema del modelo. A continuación se realiza una descripción más detallada de cada una de las secciones:

- **Elementos:** Están compuestos por los objetivos, criterios, actores involucrados, juicios de valor (conflictos), conocimiento, experiencia, intuición, alternativas. Los elementos que participan en un proceso de decisión por lo general se miden en escalas diferentes (peso, distancia o tiempo por ejemplo), por lo que se requiere transformar estas unidades en una unidad abstracta que sea válida para todas las escalas.
- **Proceso:** Está integrada por la jerarquización y priorización.
  - **Jerarquización:** Relación de orden entre las alternativas, se requiere de un modelo de decisión.
  - **Priorización:** Razón de proporcionalidad, en términos de cuánto mejor es una alternativa que otra; se requiere de un proceso de evaluación.
- **Resultado:** Es la decisión sobre selección de una alternativa, jerarquización o priorización de proyectos.

En esencia, la Decisión Multicriterio es una optimización con varias funciones objetivo simultáneas y un único agente decidor. Esto puede formularse matemáticamente de la siguiente manera:

$$\max : F(x) ; x \in X \quad (2.5)$$

En donde:

- $x$  Es el vector  $[x_1; x_2; x_3; \dots; x_n]$  de las variables de decisión. El problema de decisión es el de asignar los “mejores”.
- $X$ , Es la denominada región factible del problema (el conjunto de posibles valores que pueden tomar las variables).

- $F(x)$ : Es el vector  $[f_1(x); f_2(x); \dots; f_p(x)]$  de las  $p$  funciones objetivo que recogen los criterios u objetivos simultáneos del problema.

### 2.9.1. Clasificación Técnicas Multicriterio

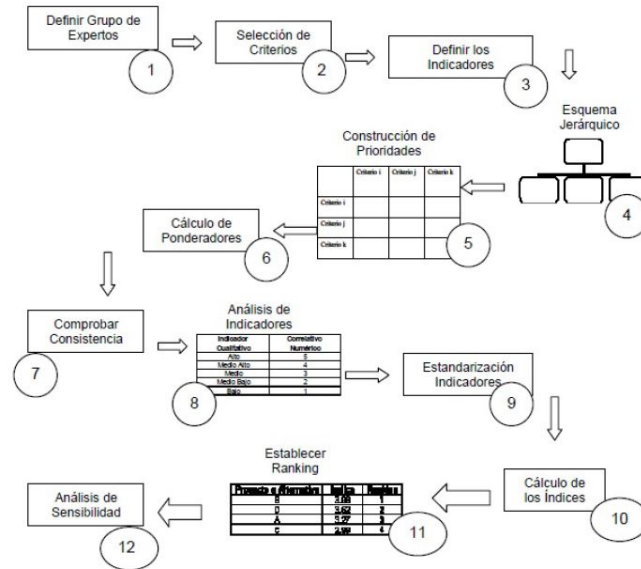
Existen 3 grandes grupos en los que puede separarse la evaluación multicriterio, estos se distinguen por el flujo de información entre quién formula el modelo (Analista) y el agente decidor, quién es el que toma la decisión final sobre el proyecto.

- Técnicas sin información a priori: Son aquellas en las que el flujo de información va desde el analista al decidor. Entre estas técnicas destacan: el método de ponderaciones, el de la restricción y el simplex multicriterio. Sin embargo debido a que genera conjuntos de soluciones muy amplios, resulta poco práctico para problemas de tamaño mediano.
- Técnicas con información a priori: El flujo de información fluye va en sentido contrario, es decir del decidor al analista. En este grupo se puede hacer una distinción, dependiendo si el problema cuenta con alternativas finitas o infinitas. En el caso de presentarse un problema con infinitas alternativas, se utilizan técnicas de optimización en la cual se busca expresar los diferentes criterios en un denominador común. Los métodos usados para estos problemas son: métodos de programación por compromiso o programación por metas. Si el problema tiene un conjunto de alternativas discreto, entonces puede hacer otra distinción:
  - Métodos de agregación: en estos métodos se modelan las preferencias a través de una función de valor:
    - Directos - Teoría de utilidad multiatributo (MAUT): Son aquellos que están diseñados para obtener la utilidad de alternativas a través de los atributos valiosos. Para cada atributo de determina una función de utilidad, y luego éstas se agregan a una función general multiatributo. Está fundamentada en los axiomas de maximización de utilidad, tricotomía, que quiere decir que al ser comparables dos acciones, existe un ordenamiento, y transitividad.

- Jerárquicos - Proceso analítico jerárquico (AHP): Método desarrollado por Thomas Saaty, diseñado para resolver problemas complejos de criterios múltiples discretos. Requiere de evaluaciones subjetivas entre la importancia relativa de cada uno de los criterios por parte del agente decidor, para luego dar a conocer su preferencia respecto de cada alternativa en base a cada criterio. El resultado que se obtiene es una jerarquización de las alternativas.
- Métodos basados en relaciones de orden: Se modelan las preferencias a través de un sistema de relaciones binarias:
  - Métodos de Superación (MS): Se comparan dos alternativas respecto a todos los criterios a través de relaciones binarias. Se busca determinar si una alternativa supera a otra buscando criterios suficientes que señalen su supremacía. Las relaciones que se establecen no son necesariamente transitivas, según dice [48]
  - Técnicas en las que el flujo de información es en los dos sentidos, dando lugar a las denominadas técnicas interactivas. Dentro de este conjunto de métodos, los más utilizados han sido: STEM y Método de Ziots-Wallenius. En la actualidad, casi todos los métodos pueden considerarse dentro de este último grupo, bastando para ello que el decidor revise sus juicios dentro del proceso de toma de decisiones [48]. En la actualidad, casi todos los métodos pueden considerarse dentro de este último grupo, bastando para ello que el decidor revise sus juicios dentro del proceso de toma de decisiones.

### 2.9.2. Proceso Para la Evaluación Multicriterio

Como se puede apreciar en [49] el proceso de decisión multicriterio cuenta con 12 pasos, los cuales se resumen en la figura 2.35,



**Figura 2.35:** Pasos Estructura Evaluación Multicriterio  
*Fuente:* Área de Políticas Presupuestarias y Gestión Pública. ILPES.

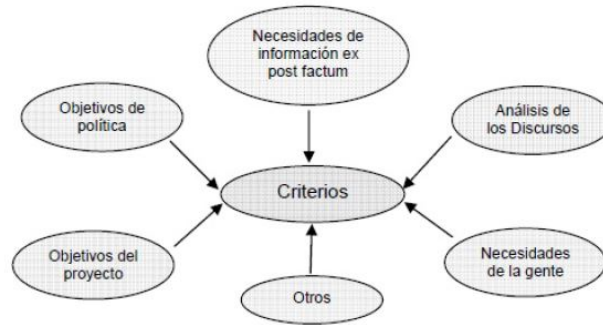
### Paso 1: Definición del Grupo de Expertos

Se define el grupo de expertos el cual debe ser capaz de construir un modelo en base a los objetivos relevantes del proyectos, se busca formar un equipo multi-disciplinario que intente analizar el problema desde distintos puntos de vista.

### Paso 2: Selección de Criterios:

Se deben identificar los criterios más relevantes para la evaluación del proyecto. Dependerá del nivel jerárquico donde se quiera implementar la iniciativa, cuáles objetivos se deben considerar, ya sea de política, planes, programas y los del propio proyecto. Si estos no están definidos previamente puede recurrir a lo siguiente para su elección: Elegir criterios que permitan recolectar información para medir ex post factum; análisis de los discursos de las autoridades relevantes; necesidades de la gente; estudiar los objetivos de la política, entre otros. Esto se puede apreciar en la figura [2.36](#)

Posterior a ello, se deben definir con claridad los criterios que se aplicarán en el proyecto, el significado que posea cada criterio será fundamental para, posteriormente, definir cuáles serán sus variables y sus indicadores.



**Figura 2.36:** Selección de Criterios

*Fuente:* Área de Políticas Presupuestarias y Gestión Pública. ILPES.

### Paso 3: Especificar Variables e Indicadores

De acuerdo a los criterios seleccionados en este paso se define la forma en que serán medidos, además se les asigna relevancia definiendolos como criterios y subcriterios.

### Paso 4: Esquematizar Jerárquica del Problema

Cuando se hayan definido los criterios, se debe construir el esquema jerárquico del modelo. Éste es de gran utilidad para el ordenamiento de la racionalidad del proceso.

### Paso 5: Determinación de prioridades de los criterios

Se debe ingresar los juicios respecto de la importancia relativa de los criterios y sus subcriterios. Debe identificar cuáles son sus posibilidades de establecer las relaciones de importancia entre ellos. Para ello se utilizan las propiedades de matrices con el fin de obtener las ponderaciones que describan la importancia relativa de cada criterio sobre otro, con respecto al cumplimiento del objetivo general del proyecto. Ahora definimos  $R$  como una matriz  $n \times n$ , en donde  $n \in Z^+$ . Sea  $r_{i,j}$  el elemento  $(i, j)$  de  $R$ , para  $i = 1; 2; \dots; n, y j = 1; 2; \dots; n$ . Decimos que  $R$  es una matriz de comparaciones pareadas de  $n$  criterios, si  $r_{i,j}$  es la medida de la preferencia del criterio en la fila  $i$  cuando es comparada con el criterio de la columna  $j$ . Cuando  $i = j$ , el valor de  $r_{i,j}$  será igual a 1, debido a que se está comparando el criterio consigo mismo [50]. De esta manera la matriz de comparaciones  $R$  queda de la siguiente manera:

$$R = \begin{pmatrix} 1 & r_{1,2} & \dots & r_{1,n} \\ r_{2,1} & 1 & \dots & r_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{n,1} & r_{n,2} & \dots & 1 \end{pmatrix}$$

En la figura 2.37 se muestra un ejemplo de una matriz R:

	<b>Criterio L</b>	<b>Criterio M</b>	<b>Criterio N</b>
<b>Criterio L</b>	1	$r_{1,2}$	$r_{1,3}$
<b>Criterio M</b>	$r_{2,1}$	1	$r_{2,3}$
<b>Criterio N</b>	$r_{3,1}$	$r_{3,2}$	1

**Figura 2.37:** Ejemplo de Matriz de Comparaciones de Criterios

*Fuente:* Área de Políticas Presupuestarias y Gestión Pública. ILPES.

## Paso 6: Cálculo de Prioridades

Para calcular las prioridades se utiliza la escala de preferencias propuestas por [48] en el cual se define la valoración numérica a un valor cualitativo, lo que se puede apreciar en la figura 2.38.

Intensidad	Definición	Explicación
1	De Igual Importancia	Dos Actividades contribuyen de igual forma al objetivo
3	Moderada	La experiencia y el juicio favorecen levemente a una actividad sobre la otra
5	Fuerte	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente a una actividad sobre la otra
7	Muy Fuerte	Una actividad es mucho más favorecida que la otra su predominancia se demostró en la práctica
9	Extrema	La evidencia que favorece una actividad sobre la otra, es absoluta y totalmente clara
2,4,6,8	Para transar entre los Valores anteriores	Cuando se necesita un compromiso de las partes entre valores adyacentes

**Figura 2.38:** Escala de preferencias propuesta por Thomas Saaty

*Fuente:*[48]

Es importante señalar que al realizar las comparaciones binarias, el criterio de

menor valoración en la escala numérica es el recíproco del de mayor valor, de modo que  $x^1 * x = x * x^1 = 1$ .

A partir de lo anterior, se construye un vector de prioridades utilizando las matrices de comparaciones, que determinan el peso o importancia que tiene cada criterio para el cumplimiento del objetivo general. Para esto se recurre a métodos matriciales que calculan los valores y vectores propios asociados a la matriz de comparaciones. Con anterioridad se definió  $r_{i,j}$  como la medida de la preferencia del criterio en la fila  $i$  cuando es comparada con el criterio de la columna  $j$ , de acuerdo a la escala de Saaty. Considerando la matriz  $R$ , dentro de la cual se cumple que  $r_{i,j} + r_{j,i} = 1$ , se puede decir que la matriz de comparaciones es una matriz recíproca. Luego, se define  $w_i$  con  $i = 1; 2; \dots; n$ , como la prioridad o peso del criterio  $i$ . Si las prioridades fuesen conocidas la matriz de comparaciones tendría la siguiente forma:

$$A = \begin{pmatrix} \frac{w_1}{w_1} & \frac{w_1}{w_2} & \dots & \frac{w_1}{w_n} \\ \frac{w_2}{w_1} & \frac{w_2}{w_2} & \dots & \frac{w_2}{w_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{w_n}{w_1} & \frac{w_n}{w_2} & \dots & \frac{w_n}{w_n} \end{pmatrix}$$

Una vez completada la matriz, el problema se transforma en un problema de Vectores y Valores propios:

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

En donde:

- $A$ = Matriz recíproca de comparaciones a pares (Juicios de importancia/ preferencia de un criterio sobre otro)
- $w$ =Vector propio que representa el ranking u orden de prioridad
- $\lambda$ = Máximo valor propio que representa una medida de la consistencia de los juicios

La matriz  $A$  tiene una forma particular, además de ser una matriz recíproca, tiene rango 1, ya que las filas son múltiplos de la primera fila. Es por esto que la matriz

tiene solo un valor propio distinto de 0. Recordando que la suma de los valores propios es igual a su traza (suma de los elementos de la diagonal principal), y sabiendo que todos los elementos de la diagonal principal tienen valor 1, se deduce que el único valor propio de A es igual a la dimensión de la matriz. Esto quiere decir que  $\lambda = n$ . Por otra lado se puede observar que la suma de los elementos de cada columna j de la matriz es:

$$\frac{1}{w_j} * \sum_{i=1}^n w_i = \frac{1}{w_j}$$

Por lo tanto, al normalizar la matriz A por medio de la suma por columnas, es decir, dividir cada elemento de una columna j por la suma de todos los elementos de la columna, se obtiene en cada nueva columna el vector w. Entonces, al promediar por fila cada valor de la matriz normalizada, se obtiene el vector propio de la matriz, es decir, el vector de prioridades. Al ingresar juicios subjetivos en la matriz R, no necesariamente tienen que ser consistentes, por lo que la matriz R se considera una perturbación de la matriz a. Dada esta situación podría existir más de un valor propio para R. El máximo valor propio  $\lambda_{max}$  está asociado a un vector propio z, y se considera que z es una buena aproximación de w. Dado esto se puede definir:

$$R * w = \lambda_{max} * w$$

Por lo tanto, la matriz de comparaciones normalizada es:

$$R_{i,jNorm} = \left[ r_{i,jNorm} = \frac{r_{i,j}}{\sum_{i=1}^n r_{i,j}} \right]$$

Finalmente, el cálculo de prioridades promediado por filas de la matriz normalizada queda:

$$w = \begin{pmatrix} w_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_{1,jNorm} \\ w_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_{2,jNorm} \\ \vdots \\ w_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_{n,jNorm} \end{pmatrix}$$

[49]

### Paso 7: Comprobar Consistencia

Se debe verificar el grado de consistencia de los juicios, es decir, se debe cumplir los principios de transitividad y proporcionalidad en las preferencias:

- Transitividad: Este principio dice que si el criterio 1 es mejor que el criterio 2, y el criterio 2 es mejor que el criterio 3, entonces el criterio 1 tiene que ser mejor que el criterio 3.
- Proporcionalidad: Este principio dice que si criterio 1 es 2 veces mejor que criterio 2 y criterio 2 es 5 veces mejor que criterio 3, entonces criterio 1 es 10 veces mejor que criterio 3.

Se debe tener especial cuidado con la verificación de estos principios, pues si la persona que construye el modelo no es cuidadoso con las valoraciones de los criterios, el peso de éstos podría ser poco representativo.

Se define el Índice de Consistencia:

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$$

Luego, se debe comparar el resultado anterior con el índice de consistencia aleatorio (IA), el cual se obtuvo de la simulación aleatorio de matrices recíprocas usando la escala de Thomas Saaty. Este índice de consistencia aleatoria (IA) se obtiene de acuerdo a la dimensión  $n$  de la matriz a comparar.

A partir de lo anterior se define el Relación de Consistencia (RC) como:

$$RC = \frac{IC}{IA}$$

La RC va a definir si la matriz es consistente, por lo que se puede definir que:

- i)  $RC = 0$ : La matriz es consistente, al igual que el vector de prioridades.
- ii)  $RC \leq 0,1$ : La matriz tiene una inconsistencia aceptable, por lo que se admite como consistencia al igual que el vector de prioridades.
- iii)  $RC > 0,1$ : La matriz tiene una inconsistencia inadmisibles, por lo que se deben revisar los juicios.

### Paso 8: Análisis de Indicadores

La información cualitativa debe ser “cuantificada” para que sea aplicable a los métodos (esto es válido para los modelos que se están explicando). Para esto debe construir tablas que permitan su homologación numérica. En estas se deben establecer los grados del atributo y su correspondiente numérico.

La información cuantitativa de los indicadores proviene de diferentes medidas, y por lo tanto, de diferentes escalas que hacen imposible una comparación objetiva entre ellas. Una de las formas posibles de hacerlas comparables, y es lo que se hace para el método AHP, es clasificar la información de cada indicador en tablas que indiquen los diferentes grados de la característica. Se debe crear una escala con valores mínimo, máximo e intermedios tales que agrupen todo el rango de valores del indicador cuantitativo. Para el método AHP es importante que el rango de las escalas de las tablas, tanto cuantitativas como cualitativas, sea el mismo, esto se aprecia en la figura 2.39.

Indicador cualitativo	Correlativo numérico
Alto	5
Medio alto	4
Medio	3
Medio bajo	2
Bajo	1

Proyecto	Indicador cualitativo	Correlativo numérico
A	Medio bajo	2
B	Alto	5
C	Medio	3
D	Medio alto	4

**Figura 2.39:** Ejemplo de Análisis de los Indicadores

*Fuente:* Área de Políticas Presupuestarias y Gestión Pública. ILPES.

### Paso 9: Evaluación de las Alternativas

Se realiza el cálculo de los índices de cada indicador de acuerdo a cada subcriterio definido para cada uno de las alternativas posibles.

### Paso 10 Ranking de Alternativas

Se ordena jerárquicamente los índices calculados para cada alternativa de mayor a menor. Finalmente la mejor opción de preferencia, es aquella que obtuvo un mayor valor en la evaluación. Un ejemplo de esto se muestra en la figura 2.40

Proyecto o alternativa	Índice
A	3,27
B	3,98
C	2,99
D	3,52

→

Proyecto o alternativa	Índice	Ranking
B	3,98	1
D	3,52	2
A	3,27	3
C	2,99	4

**Figura 2.40:** Ejemplo de Ranking de Alternativas

*Fuente:* Área de Políticas Presupuestarias y Gestión Pública. ILPES.

## Paso 11 Análisis de Sensibilidad

Se realizan cambios con respecto a las ponderaciones relativas de los principales criterios para ver los cambios en el comportamiento del ranking establecido. Es así como se van definiendo escenarios posibles y se van comparando con el escenario actual. Finalmente, se debe establecer bajo qué condiciones la priorización o jerarquización de las alternativas evaluadas se mantiene. [49]

## 3 | Metodología

### 3.1. Análisis de Zonas Saturadas

La primera parte de este trabajo consiste en el análisis de la presencia de centrales térmicas en las zonas saturadas, con el fin de seleccionar las zonas que presenten la mayor cantidad de contaminación por el uso de energías convencionales de generación. Posteriormente se seleccionará una según la cantidad de generación mediante centrales térmicas a carbón.

#### 3.1.1. Análisis de las características de la zona

El proceso comienza con un conocimiento acabado de la zona a evaluar, sus habitantes, el desarrollo industrial de la zona, el clima, el tipo de contaminación que presenta, los principales contaminantes que son emitidos al ambiente y los responsables de cada uno de estos. Por otra parte es importante conocer la relación que existe entre la comunidad y la industria de la zona debido a que esta relación es vital a la hora de evaluar futuros proyectos.

#### 3.1.2. Análisis de disponibilidad de recursos

Actualmente se cuenta con diversos software que permiten obtener la disponibilidad de recursos en distintas zonas de nuestro país, los más utilizados a la hora de evaluar recursos renovables son el Explorador de Energía Solar creado por la Universidad de Chile con el fin de ser un indicador base a la hora de evaluar proyectos solares, otorgando una información horaria de la cantidad de recurso disponible durante el

año. Por otra parte para la evaluación del recurso eólico existe el Explorador de Energía Eólica de los mismos creadores el cual no solo entrega información horaria del viento medio en una ubicación en particular, sino que además cuenta con información para distintas alturas y evalúa el rendimiento de distintos tipos de aerogeneradores que se encuentran actualmente presente en el mercado. La información de estos exploradores puede ser contrastada con diversos software a nivel internacional los cuales proveen información mucho más exacta de la disponibilidad de recursos y que han sido validados por la literatura científica para la energía solar se utiliza SolarGis el cual es un software de pago el cual entrega la misma información que el Explorador Solar pero con una exactitud mucho mayor. En el caso de la energía eólica se trabaja con archivos del tipo Weather Research and Forecasting Model (WRF) los cuales incluyen información del clima de la zona que se requiera, estos archivos incluyen no solo información del viento medio, sino que también temperatura, humedad, nubosidad entre otros.

### 3.1.3. Análisis de Factibilidad Técnica

No solo la disponibilidad de recursos se debe evaluar en las zonas donde se evalúan los proyectos, se deben considerar también aspectos técnicos que son muy relevantes y que definirán la posibilidad de instalar o no algunos tipos de tecnología, los factores a evaluar se definen a continuación:

#### Disponibilidad de Terrenos

Las centrales solares y eólicas requieren cantidades de terrenos muy superiores a las centrales térmicas, debido a que su combustible no puede ser concentrado y se debe obtener del medio ambiente. Actualmente existen software de información los cuales nos pueden entregar mapas de uso de territorios en los cuales se aprecia no solo el relieve, sino que el tipo de actividad que se concentra en zonas cercanas.

### **Profundidad del Suelo Marino**

Para las centrales eólicas OffShore se requiere una profundidad del suelo marino menor a los 50 metros para que los aerogeneradores no requieran la utilización de soportes flotantes los que hacen que este tipo de centrales sean inviables en costos, además se debe mencionar que este tipo de tecnología aún se encuentra en desarrollo. Es posible analizar este factor a través del software Google Earth disponible en su versión abierta al público.

### **Variabilidad del Recurso y Niveles Medios Mínimos**

La literatura ofrece información respecto a los niveles mínimos de recurso que se deben poseer para la evaluación de las distintas centrales, estos aspectos serán detallados a continuación en la evaluación de cada tipo de central.

## **3.2. Optimización de los Recursos**

Con el fin de obtener una utilización óptima de los recursos en la zona a evaluar y considerando factores particulares de la zona se define un modelo de programación lineal entera (PLE) que entrega la decisión óptima de que tamaño deben ser las centrales a construir en la zona con el fin de entregar un máximo de horas sobre cierto nivel mínimo de energía, con esto se intenta resolver el mayor problema de las ERNC el cual viene dado por la intermitencia de la entrega de energía.

La definición de que centrales utilizar y cuanta potencia instalar de cada una de estas tiene una importancia fundamental a la hora de utilizar de manera óptima los recursos disponibles en la zona, es por esto que se utilizara un modelo de programación lineal entera que entregue como resultados la capacidad instalada para cada tipo de tecnología a evaluar. Con el fin de utilizar cada uno de los recursos y tecnologías disponibles en la zona se proponen una serie de restricciones que exigen al menos instalar una capacidad instalada mínima para cada una de las tecnologías.

### 3.2.1. Consideraciones del Modelo

- Se asume linealidad en la generación de energía, es decir la cantidad de energía producida por 50 MW de capacidad instalada es la cantidad de energía generada por la unidad base (1 MW) por el factor de escalamiento.

$$X_{kt} = k * X_{1t} \quad (3.1)$$

Donde:

- $X_{kt}$  :Energía generada por una central de capacidad instalada k en el tiempo t.
  - k: Capacidad instalada de la central de generación.
  - $X_{1t}$  :Energía generada por una central de 1 MW de capacidad instalada.
- El modelo asume un año promedio de generación independiente de factores climáticos externos que pueden ocurrir.
  - Se asume como factor de mayor relevancia el entregar la mayor cantidad de energía constante en el tiempo.
  - En el modelo inicial no se consideran los costos como relevantes a la hora de evaluar el modelo.
  - El modelo evalúa la cantidad de MW a instalar de cada central sujeto a un nivel máximo de MW a instalar por la suma de todas las instalaciones.

### 3.2.2. Inputs del Modelo

**Tecnologías a Evaluar:** Luego de realizado el análisis de recurso disponible y factibilidad técnica se definen las alternativas de proyecto a evaluar.

**Datos de Generación de cada Tipo de Central (horario):** Mediante la utilización del software SAM-NREL en conjunto con el Explorador de Energía

Eólica y aplicando los métodos de evaluación de pérdidas definidos en [49] para energía eólica y en el software SAM-NREL. Se obtienen datos de generación de energía para cada hora en un año promedio para una central tipo de 200 MW de capacidad instalada, asumiendo linealidad en la generación este valor es llevado a una base de 1 MW de capacidad instalada obteniéndose así 8760 datos para 4 tipos de centrales (Solar PV, Solar CSP, Eólica Offshore y Eólica Onshore).

### Capacidad Instalada Mínima y Máxima para cada Tipo de Central de Generación

Analizando los datos de la CNE se obtienen los máximos tamaños de centrales de generación construidos actualmente para cada una de las tecnologías analizadas, estos valores serán considerados como base del modelo, para la tecnología Eólica Offshore se utilizará una restricción con respecto a la central Onshore debido a los incrementos de costos existentes por la utilización de dicha tecnología.

### 3.2.3. Modelo de Programación Lineal Entera

#### Conjuntos

- I: Conjunto de centrales de generación a evaluar:
  - $i=1$  Central Solar PV
  - $i=2$  Central Solar CSP
  - $i=3$  Central Eólica Offshore
  - $i=4$  Central Eólica Onshore
- T: Conjunto de horas en el año  $t=1,2,3,\dots,8760$ .

#### Parámetros

- $E_{min_i}$ : Capacidad instalada mínima a instalar de la central del tipo  $i$ .
- $E_{max_i}$ : Capacidad instalada máxima a instalar de la central del tipo  $i$ .

- $E_{it}$ : Energía generada por la central de tipo  $i$  en el tiempo  $t$ .
- $N$ : Nivel de energía mínima a suministrar en cada período de tiempo.
- $C_{max}$ : Capacidad instalada total a instalar como suma de toda las tecnologías.

### Variables

- $X_i$ : Capacidad Instalada a construir para la central del tipo  $i$ .
- $Y_{it}$ : Energía Generada por la central del tipo  $i$  en la hora  $t$ .
- $Z_t$ : Energía Total Generada en la hora  $t$ .
- $W_t$ : Variable Binaria
 
$$\begin{cases} W_t = 1 & \text{La energía total generada en el tiempo } t \text{ es superior al valor solicitado} \\ W_t = 0 & \text{En otro caso} \end{cases}$$

### Restricciones

- **Energía generada**

$$Y_{it} = X_i * E_{it} \quad (3.2)$$

- **Energía total generada**

$$Z_t = \sum_i Y_{it} \quad (3.3)$$

- **Cumplir requerimiento**

$$W_t * N \leq Z_t \quad (3.4)$$

- **Capacidad Máxima a instalar**

$$\sum_i X_i \leq C_{max} \quad (3.5)$$

- **Capacidad Máxima por Tecnología**

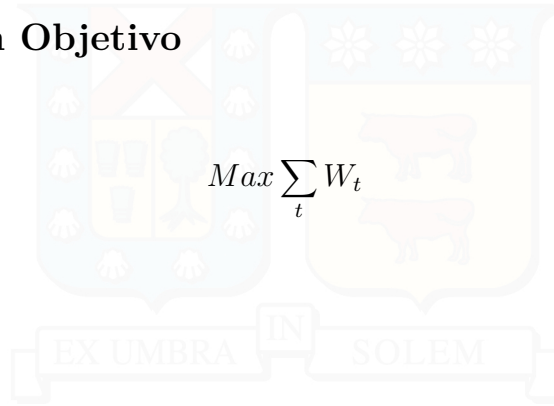
$$X_i \leq E_{max} \quad (3.6)$$

- Capacidad Mínima por Tecnología

$$X_i \leq E_{min} \quad (3.7)$$

### 3.2.4. Función Objetivo

$$Max \sum_t W_t \quad (3.8)$$



### 3.3. Evaluación Económica

Posteriormente al análisis técnico de las centrales de generación y de obtener el tamaño de cada una de estas se procede a realizar una evaluación económica de cada una de las centrales. Como el modelo busca reemplazar el funcionamiento de una central de generación térmica se considerarán como ingresos de las nuevas centrales la reducción de costos por dejar de usar en parte la central térmica además de la venta de bonos de carbono por la disminución de emisiones contaminantes. En la tabla 3.1 se muestran los costos y atributos generales a considerar en la evaluación de cada una de las plantas.

**Tabla 3.1:** Atributos Generales para la Evaluación de Centrales

Costo de Carbón	90	(USD/Ton Carbón)
Costo de O&M	48000	(USD/MW)
Factor de Planta	0,8	
Conversión de Carbón	2	(MWh/Ton Carbón)
Factor de Emisiones	0,36	(Ton/Mwh)
Precio venta atributos ERNC	6	(USD/MWh)
Precio venta Bonos de carbono	7,28	(USD/Ton CO2)
Inflación	3 %	

Con el fin de reducir la carga económica al nivel de inversión se evalúa la opción de solicitar créditos, el nivel seleccionado de recursos propios, ajenos, el nivel de interés entre otros se muestran en la tabla 3.2.

A continuación se describen los costos y metodologías de evaluación de cada tecnología en particular:

#### Evaluación de Centrales Solares

Teniendo en cuenta lo anterior, para dimensionar y simular la conducta de las plantas en las distintas zonas del país se utilizará el software System Model Advisor (SAM), desarrollado por el National Renewable Energy Laboratory de Estados Unidos

**Tabla 3.2:** Tipo de Financiamiento Seleccionado

Recursos Propios	20 %
Recursos Ajenos	80 %
Duración del Préstamo (Años)	20
Interés Préstamo	4,55 %
Comisión Apertura	0,75 %
Gastos Tramitación (USD)	1089,2

Fuente: Elaboración Propia

(NREL) el cual toma como input la información meteorológica de la zona y la potencia eléctrica neta que se quiera generar (entre otros) para calcular el resto de los parámetros de la planta y simular el comportamiento de la esta con una resolución horaria a lo largo de todo el año.

### Requerimiento de Datos

Para realizar una simulación en SAM es necesario un archivo tipo TMY3 (Typical Meteorological Year 3), el cual contiene promedios horarios, para las 8.760 horas del año, de la radiación solar en sus distintas formas (Global Horizontal Irradiation, GHI, Direct Normal Irradiation, DNI, Diffuse Horizontal Irradiation, DHI), de la temperatura (de bulbo seco, bulbo húmedo y punto de rocío), la humedad relativa, la presión atmosférica y la velocidad del viento. Este tipo de datos está disponible en Chile sólo para Antofagasta, Santiago, Concepción, Isla de Pascua, y Punta Arenas. Por otro lado, el Ministerio de Energía se ha encargado de recopilar tal información en 9 estaciones situadas en el norte de Chile para caracterizar su potencial solar, incluyendo casi todas las variables necesarias en un archivo TMY3 para las siguientes zonas (subestaciones del SING): Pozo Almonte, San Pedro de Atacama, Crucero, Pampa Camarones, Inca de Oro, Puerto Angamos, Salar, Salvador y Cerro Armazones. Para núcleos poblados ubicados en zonas intermedias a estas se pueden considerar combinaciones lineales de zonas cercanas o de similares características. Específicamente para la central solar CSP luego de definir la localización del proyecto a través del archivo TMY3, se deben especificar ciertos parámetros de capacidad,

específicamente respecto a la capacidad eléctrica de la planta y la capacidad del sistema de almacenamiento térmico que en este caso son extraídos de los datos del ministerio de energía [51]. Por otra parte se debe entregar el dato del múltiplo solar en el que se quiere trabajar y el tipo de fluido que circulará por los tubos y que será utilizado para la generación de vapor.

### Optimización y Salidas del Simulador

Luego de entregados los inputs básicos descritos en los párrafos anteriores, SAM utiliza un modelo de optimización para el sistema de captación de energía solar que permite diseñar tanto el campo de heliostatos (cantidad de heliostatos o paneles y su layout), en el caso de la central CSP además incluye características de la torre (altura) y el receptor (dimensiones). Esta optimización considera las variables ya ingresadas al simulador para obtener el mejor rendimiento financiero y energético desde la planta.

Una vez que se realiza la simulación en SAM, este software entrega datos de la operación de la planta y de su rendimiento financiero. Respecto a su operación, cabe destacar series temporales de su generación eléctrica, el almacenamiento de calor en los tanques y las pérdidas de energía en sus distintos componentes, dentro de un listado de variables. En cuanto a su rendimiento financiero, SAM realiza una evaluación económica desde la perspectiva de la empresa de generación de energía considerando las inversiones realizadas, los costos operacionales y los ingresos por ventas de energía.

### Estimación de Costos

**Central Fotovoltaica:** Los datos de inversión utilizados para esta simulación fueron obtenidos de la CNE [52] en cuanto a los costos de funcionamiento son extraídos de IRENA (Agencia Internacional de las Energías Renovables) [51], estos son resumidos en la tabla 3.3

**Central CSP:** En este caso no existen niveles de inversión proveídos por el ministerio

**Tabla 3.3:** Nivel de inversión y costos de funcionamiento

Costo Inversión (USD/KW)	\$ 2.100
Costo O&M (USD/MW)	\$ 16
Costo Administrativos (USD/MWh)	\$ 3

Fuente: Elaboración Propia

de energía en [52], por lo cual se utilizarán los datos obtenidos directamente desde el software y serán contrastados con los valores entregados por la IRENA [51].

Los costos de funcionamiento de este tipo de centrales se muestran en la tabla 3.4 fueron obtenidos de [51]

**Tabla 3.4:** Costos de Funcionamiento Central CSP

Costo O&M (USD/MWh)	\$ 30
Costo Administrativos (USD/MWh)	\$ 6

Fuente: Elaboración Propia

## Metodología de evaluación de Centrales Solares

### Evaluación de Central Eólica

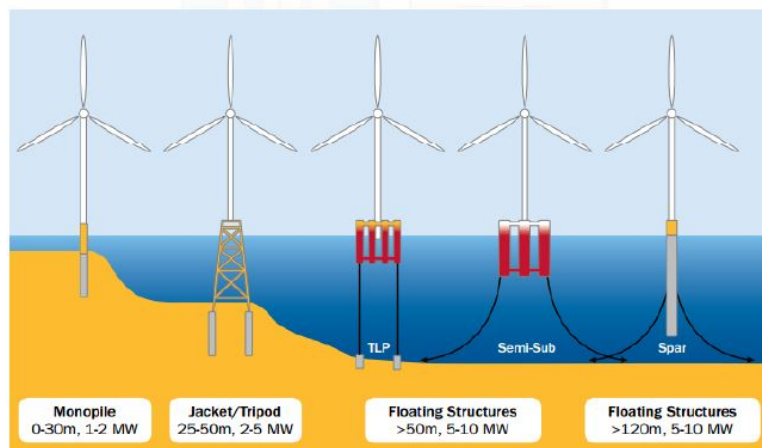
Luego de definida la zona geográfica donde se construirá la central se debe evaluar el recurso eólico que presenta. Para esto se utilizarán los informes generados por el explorador de recurso eólico. <sup>21</sup>

En particular para la central eólica OffShore se debe evaluar la profundidad del fondo marino con el fin de evaluar el tipo de soporte que será necesario utilizar para la ubicación de la central, en la figura 3.1 se aprecia el tipo de soporte según la profundidad del lecho marino.

### Evaluación Económica

**Central Eólica OnShore:** Para la evaluación económica del proyecto se utilizan los datos de costos para inversión obtenidos del documento de la CNE [52]

<sup>21</sup><http://walker.dgf.uchile.cl/Explorador/Eolico2>



**Figura 3.1:** Potencia y profundidad recomendada para cada cimentación

Fuente: [40]

los cuales son actualizados año a año y son calculados según los costos de las centrales que se encuentran en proceso de estudio y otras que ya están en construcción. A los cuales entrega un peso distinto a la hora de calcular un nuevo valor para los nuevos proyectos. Por otra parte los costos de operación y mantenimiento fueron obtenidos desde la IRENA [51] documento que entrega un desglose de costos para todos los tipos de energías renovables, estos últimos son complementados con información del NREL<sup>22</sup>. Los datos de niveles de costos e inversión se pueden apreciar en 3.5.

**Tabla 3.5:** Costos de Inversión y Operación

Costo Inversión (USD/KW)	\$ 2.300
Costo O&M (USD/MWh)	\$ 25
Costo Administrativos (USD/MWh)	\$ 5

Fuente: Elaboración Propia

**Central Eólica OffShore:** Para la central eólica OffShore no existen estudios a nivel nacional en cuanto a inversión, es por esto que el nivel de inversión, los costos de operación y mantenimiento fueron obtenidos desde la IRENA [51] documento que entrega un desglose de costos para todos los tipos de energías

<sup>22</sup>Distributed Generation Renewable Energy Estimate of Costs, NREL 2016

renovables, estos últimos son complementados con información del NREL<sup>23</sup>. Los datos de niveles de costos e inversión se pueden apreciar en 3.6.

**Tabla 3.6:** Costos de Inversión y Operación

Costo Inversión (USD/KW)	\$ 4.000
Costo O&M (USD/MWh)	\$ 35
Costo Administrativos (USD/MWh)	\$ 8

Fuente: Elaboración Propia

Finalmente se muestran datos importantes que se refieren al nivel de pérdidas de energía total de generación los cuales son estimados según [53], por otra parte se muestran los precios de la ventas de los bonos de carbono Banco Mundial, 2016 y costos de seguros, los cuales son similares a los proyectos ingresados a evaluación.

**Tabla 3.7:** Datos Relevantes para la Evaluación de la Central Eólica

Perdidas de Energía	23,58 %
Seguro de RC (USD)	\$ 1.020.000
Seguro por catástrofe (USD)	\$ 65.000

Fuente: Elaboración Propia

<sup>23</sup>Distributed Generation Renewable Energy Estimate of Costs, NREL 2016

## 3.4. Evaluación Social Costo-Beneficio

### 3.4.1. Cuantificación de Beneficios de Nuevos Empleos

Para obtener el beneficio obtenido por la generación de empleos, a partir de la ejecución de una nueva empresa, se seguirán los pasos del estudio realizado por la dirección de inversión y finanzas públicas de Colombia [55], en donde se define que:

$$EmpleosGenerados = Numempl(year) * salprom(USD/year) \quad (3.9)$$

Para obtener los valores del salario promedio se utilizará el documento del NREL [56].

### 3.4.2. Precios Sociales

Cuando se realiza la evaluación social de los proyectos es muy importante considerar los efectos (positivos o negativos) que tiene un proyecto, pues no siempre la evaluación privada refleja el verdadero costo de oportunidad de los recursos a utilizar. Esto se debe principalmente a la existencia de impuestos, subsidios, precios mínimos y máximos.

Es por esta razón que se sugiere revisar los efectos que no son considerados en la evaluación privada como los son los efectos indirectos que el proyecto genera sobre los mercados relacionados, además de las externalidades que son los efectos positivos o negativos que produce el proyecto sobre otros agentes económicos. Ante esta situación es que se utilizan los Precios Sociales, los cuales reflejan el verdadero costo para la sociedad de las unidades adicionales de recursos a utilizar en la ejecución y operación de un proyecto de inversión. Este VAN Social considera los beneficios y costos sociales del proyecto, con lo cual se utiliza una tasa social de descuento del 6%. Para este proyecto se utilizan algunos precios sociales indicados por el Ministerio de Desarrollo Social, mientras que también se utilizan algunos factores de corrección en algunos costos, como en la inversión y en la mano de obra (Tabla 3.8). Es la Tasa Social de Descuento establecida por el Ministerio de Desarrollo Social.

**Tabla 3.8:** Factor de corrección para mano de obra

Tipo de Mano de Obra	Factor de Corrección
Calificada	0,98
Semi Calificada	0,68
No Calificada	0,62

### 3.5. Evaluación Multicriterio

Para la evaluación multicriterio se utilizará como guía el análisis realizado por [49] complementándolo con aspectos de esta investigación en particular.

En la tabla 3.9 se pueden apreciar los criterios a evaluar en este trabajo.

**Tabla 3.9:** Sub-Criterios a Evaluar

Criterio	Sub-Criterios
<b>Impactos Sociales</b>	a) Riesgo No Cancerígeno
	a) Riesgo Cancerígeno
	b) Educación
	c) Investigación e Innovación
	d) Concientización Ambiental
	e) Autoestima de la Comunidad
	f) Aceptabilidad de la Comunidad
<b>Impactos Ambientales</b>	g) Creación de Empleos
	a) Emisión de Metales Pesados
	b) Emisiones GEI
	c) Residuos sólidos y líquidos
	d) Requerimiento de Tierras
<b>Impactos Económicos</b>	e) Impacto sobre flora y fauna local
	a) Desarrollo Turístico
	b) Tasa de Compensación
	c) Costos Energéticos
	d) Usos de Agua
	e) Aprovechamiento Recurso Local
	f) Disponibilidad Energética
g) Desarrollo Económico de la Zona	

Estos criterios fueron obtenidos mediante la guía de (Gaete, R 2016) [49] y comparados con los textos (Parodi, V 2013 [58]. Chatzimouratidis, A and Pilavachi, P [59] y Cavallaro, F and Ciarolo, L 2005 [60] ). Para definir qué aspectos se evaluarán y de qué forma lo primero que se debe hacer es separar entre aspectos cuantificables y no cuantificables. De igual forma se debe mencionar que en la evaluación multicriterio se incluirán aspectos tanto cuantitativos como cualitativos.

### 3.5.1. Objetivo de la Evaluación

Entregar energía de forma sustentable al complejo industrial sin afectar el ambiente social y ambiental en el que se encuentra inmerso.

### 3.5.2. Actores Involucrados

En este caso se considerarán 3 expertos, un profesor de la Universidad Técnica Federico Santa María uno con nivel de Doctorado, un experto en el área de energía con título de Magister en Ciencias de la Ingeniería y que actualmente se encuentra trabajando en el sector energético nacional. Por otra parte se contará con la evaluación de 3 estudiantes de Magister en Ciencias de Ingeniería con Mención en Energía.

### 3.5.3. Alternativas de Proyectos

Entre las alternativas a evaluar se escogerán las dos mejores alternativas económicas evaluadas en este documento, en caso de que los resultados de dos alternativas sean similares se utilizará una adicional con el fin de evaluar los recursos.

### 3.5.4. Selección de Criterios

### 3.5.5. Criterios Sociales

#### Riesgo No Cancerígeno

Para realizar el análisis de impactos sobre la salud lo primero que se debe hacer es las formas de impactar la contaminación, en el caso de la ciudad de Mejillones como se mencionó anteriormente en el marco teórico el mayor impacto se tiene por la concentración de metales pesados en el fondo marino y en las especies marinas que existen y están expuestas a metales pesados y que luego son usadas para consumo humano.

Existen dos tipos de exposición el primero es la ingesta de metales pesados a través de alimentos contaminados y en segundo lugar la exposición por contacto dermal. La dosis de exposición por ingesta de alimentos queda definida por:

$$Dosisdeexposición_{ingesta} = \frac{CL * TC * FE}{PC}$$

En donde:

- Dosis de exposición en  $mg/Kg/día$

- CL: Concentración de contaminante en el alimento o en el agua ( $mg/Kg$ )
- TC: Tasa de ingesta del alimento ( $kg/día$ )
- FE: Factor de exposición. En este caso se considera como 1. Debido a que las personas se alimentan todos los días.
- PC: Peso corporal. ( $Kg$ )

La exposición por contacto dérmico se define por:

$$Dosis\ de\ exposición = \frac{DA_{evento} * EV * EF * ED * AS}{PC * AT}$$

En donde:

- DDA: dosis de absorción dérmica por contacto con agua ( $mg/kg/día$ )
- $DA_{evento}$ : Dosis absorbida por evento ( $mg/cm^2 - evento$ )
- EV: Frecuencia del Evento ( $eventos/día$ )
- EF: Frecuencia ( $días/año$ )
- ED: Duración de la exposición ( $años$ )
- AS: Área de la superficie corporal expuesta ( $cm^2$ )
- AT: Tiempo de exposición ( $días$ )
- PC: Peso corporal ( $Kg$ )

A su vez:

$$DA_{evento} = K_p * C_w * T_{evento}$$

En donde:

- $K_p$ : Coeficiente de permeabilidad dérmica ( $cm/hr$ )
- $C_w$ : Concentración del químico en el agua ( $mg/cm^3$ )
- $T_{evento}$ : Duración del evento ( $hr$ )
- Frecuencia del evento. Se establecerá que el contacto recreacional será de 2-4 eventos (dependiendo del grupo etario) en el día (bañarse al estar en la playa o río) y para contacto laboral (pescadores) 2 eventos al día, pero solo para manos. La duración de cada evento será de 15 minutos. Para lactantes la duración será de máximo 10 minutos.

- Frecuencia. Para contacto recreacional se establecerá, que en el mar el contacto será (en un escenario conservador), de 25 días al año (período estival), considerando que en la franja litoral muchas personas viven cerca de las playas. Para ríos será de 7 días/año, en los cursos de agua que no tienen usos recreacionales y de 15 días/año para el río Aconcagua en su tramo Parque La Victoria. Para lactantes (hasta 1 año) y tercera edad será de 3 días al año y en Parque La Victoria, 6 días al año. Para el contacto laboral la frecuencia será de 5 días a la semana (260 días al año). En un escenario laboral se considerará que estas personas podrá ir la playa también por recreación. Se establecerá que esta actividad no supera los 10 días/año. Para los ríos la frecuencia será menor, ya que no son cursos de agua adecuados para la recreación. Se establecerá una frecuencia de 5 veces al año a excepción del río de Parque Victoria que si está adecuado para recibir público.
- La duración de la exposición será el tiempo de por vida, considerando lo que se mencionó de considerar un escenario en que las personas hubiesen vivido siempre en el lugar
- Área de la superficie corporal. Se definen en la tabla 3.10.

**Tabla 3.10:** Área de contacto dermal.

Área expuesta (m <sup>2</sup> )	Lactantes	Pre-Escolares	Edad Escolar	Adolescentes	Adultos	Adulto Mayor
	< 2 Años	2-6 Años	6-12 Años	12-18 Años	18-65 Años	>65 Años
Residentes	0,61	0,95	1,48	2,06	2,48	2,3
Pobladores Asociados a la pesca	N/A	N/A	N/A	N/A	0,131	N/A
Buzos y Mariscadores	N/A	N/A	N/A	N/A	0,285	N/A
Peso Medio	9,3	16,2	29	54	73	69,9

Fuente: [61]

En la tabla 3.11 e define el coeficiente de permeabilidad dermal para distintos compuestos:

A partir de los datos generados en cuanto a la exposición se evaluarán los riesgos asociados a la salud. Se definen dos tipos de riesgo: La caracterización del riesgo no cancerígeno se realiza mediante el cálculo del coeficiente de peligrosidad HQ (Hazard Quotient). Este índice, expresa la relación que existe entre la dosis de exposición y la dosis de referencia. El uso del coeficiente de peligrosidad se basa en el supuesto de que existe un nivel seguro de exposición por debajo del cual no es probable que se produzcan efectos adversos a la salud. En general para la evaluación de riesgos no cancerígenos se usa la fórmula genérica:

$$HQ = \frac{DosisdeConcentración}{RfDoRfC}$$

Donde HQ= Cociente de Peligrosidad. RfD o RfC: Valor de referencia.

Valores de cociente de peligrosidad (HQ) mayores a 1 se consideraron no aceptables ya que probablemente cusen efectos adversos a la salud.

**Tabla 3.11:** Coeficiente de Permeabilidad Kp (*cm/hr*)

Compuesto	Coeficiente de permeabilidad Kp
Cadmio	0,001
Cromo	0,002
Cobalto	0,001
Plomo	0,0004
Mercurio	0,001
Niquel	0,0002
Potasio	0,002
Plata	0,0006
Zinc	0,0006
Otros Inorgánicos	0,001

Fuente: MMA (2014)[62]

### Riesgo Cancerígeno

El riesgo cancerígeno se calcula como el incremento de la probabilidad de aparición de cáncer durante toda la vida como consecuencia de la exposición conjunta a distintos contaminantes por medio de la misma ruta medioambiental. Para estimar los riesgos cancerígenos se utilizan como valores referenciales los “factores de pendientes” o “unidades de riesgo”. El factor de pendiente (SF) se aplica para ingestión y contacto dérmico y cuantifica el incremento de probabilidad de desarrollar cáncer como resultado de la exposición a una sustancia. Se expresa como proporción de una población afectada por mg de sustancia/peso. La unidad de riesgo (URF) indica lo mismo pero se aplica para agua o aire y se expresa en unidades de concentración de la sustancia en el ambiente (no en exposición). La fórmula para riesgo cancerígeno es:

$$\text{Riesgo de Cáncer de por Vida} = (\text{Factor de Pendiente o Unidad de Riesgo}) * \text{Dosis de Exposición}$$

Factor de pendiente en *mg/kg/día*

La EPA ha establecido un valor teórico aceptable de riesgo extra de cáncer de por vida desde uno en diez mil hasta uno en un millón. Por ejemplo, un riesgo de  $1 \cdot 10^{-6}$  significa que una persona en un millón podría desarrollar cáncer como resultado de su exposición de por vida a contaminación. En este estudio, en acuerdo con la contraparte se consideró umbrales de  $10^{-6}$  y  $10^{-5}$  para evaluar la aceptabilidad del riesgo cancerígeno (u.s. environmental Protection Agency, 2000). Donde la Unidad de riesgo está en  $(\text{mg}/\text{m}^3)^{-1}$  y la concentración de exposición en  $\text{m}^3/\text{mg}$  Tanto para riesgo cancerígeno como no cancerígeno, después de calcular el riesgo para cada una de las sustancias en

una determinada vía de exposición, se calcula el riesgo acumulado, que se basa en suponer que los riesgos son aditivos (sumatoria). Finalmente se calcula el riesgo total que implica sumar el riesgo acumulado por cada una de las vías de exposición.

Para Pb no existen aún valores de referencia, por lo que solo se calculó exposición. Para Ni no existe factor de pendiente por lo que no se calcularon riesgos cancerígenos. Para Cu y Zn no existe valor para contacto dermal (factor de absorción), por lo que solo se calculó exposición.

Elemento	RfD	MRL	Factor de Pendiente o unidad de riesgo (mg/kg/día) <sup>-1</sup> o (1/ug/m <sup>3</sup> )	
			Ingestión (mg/kg/día)	Inhalación (ug/m <sup>3</sup> )
Cu	-	0,01 <sup>26</sup>	-	-
Zn	0,3	-	-	-
Pb	-	-	-	-
As	0,0003	-	-	1,5
V	-	0,01	-	-
Ni (sales solubles)	0,02	-	-	-
Cd	0,001	-	-	-
Hg (metilmercurio)	0,0001	-	-	-
Sb	0,0004	-	-	-
Se	0,005	-	-	-
Mo	0,005	-	-	-
		Inhalación (mg/m <sup>3</sup> )		Inhalación ug/m <sup>3</sup>
Cu	-	-	-	-
Se	-	-	-	-
As	-	-	-	0,0043
Se	-	-	-	-
Pb	-	-	-	-
SO <sub>2</sub> (agudo)	-	0,0262	-	-
				Contacto dermal (RfD <sub>ABS</sub> ) (mg/kg/día)
Cd	0,000025	-	-	-
As	0,000285	-	-	1,579 <sup>27</sup>
Cr (VI) <sup>28</sup>	0,000075	-	-	-
Se	0,001500	-	-	-

**Figura 3.2:** Valores de referencia utilizados para la evaluación de riesgos por ingesta, inhalación y contacto dermal, obtenidos de IRIS databases y ASTDR (Toxic Substances Portal).

Fuente: [62].

## Educación

El correcto uso de la energía, las ventajas y desventajas de las energías alternativas y el ahorro energético son medidas que deben ser educadas a las personas para poder cuidar el medio ambiente y prevenir los cambios climáticos. [63]

## Investigación e Innovación

La implementación de proyectos o estrategias de recuperación ambiental contribuye a la sociedad debido a que genera instancias para el desarrollo de nuevas estrategias y tecnologías enfocadas en producción limpia o en resolver problemas de la contaminación [64].

## Concientización Ambiental

La medición, información e implementación de medidas que abarquen el problema del impacto ambiental genera conciencia a nivel de comunidad. Estos factores dependen principalmente del nivel de educación de las personas, el interés de los medios de comunicación, el núcleo familiar y la cultura en que se encuentren inmersos los habitantes [65].

## Autoestima de la Comunidad

La exclusión de la ciudadanía en el diseño y ejecución de programas gubernamentales para la descontaminación ha causado una disminución constante de la autoestima de la comunidad [66].

## Aceptabilidad de la Comunidad

Es un tema fundamental a la hora de analizar los proyectos energéticos, debido a que gran parte de la energía que generan los grandes proyectos no es utilizada en la misma zona en que se produce y tampoco generan beneficios en cuanto a reparaciones sociales y hasta hace muy poco tampoco lo hacían en cuanto a descuentos en las cuentas de electricidad. Esto debido a que con la Ley de Equidad Tarifaria en Servicios Eléctricos se establece un descuento en los precios de las cuentas de luz en las comunas intensivas en generación eléctrica, subsidiado por aquellas comunas que no lo son. LEY NÚM. 20.928, Junio 2016 La mejor forma de conocer la opinión de la comunidad frente a los grandes proyectos es analizar resultados de encuestas realizadas en las comunidades locales [67].

## Creación de Empleos

Poseer grandes sistemas de generación no solo puede implicar impactos negativos en la comunidad en la que se encuentra inmersa, esto debido a que grades centrales requieren mano de obra disponible, lo cual afecta directamente el nivel de empleabilidad local. Este impacto no solo se aprecia durante el funcionamiento, sino que es aún más intensivo en el momento de la construcción [68].

### 3.5.6. Criterios Ambientales

La mayor amenaza que presenta la humanidad en las próximas décadas es el deterioro de nuestro planeta, ya sea debido al calentamiento global, la contaminación ambiental, la explotación de tierras, los altos niveles de deforestación o la gran concentración de población en un planeta que no tiene un aumento de capacidad en el tiempo. Todos estos procesos afectan gravemente a muchos sistemas físicos y biológicos, los cuales están obligados a adaptarse a las nuevas condiciones, generando grandes pérdidas en diversidad para las especies que no logran adaptarse [69].

#### Emisiones de Metales Pesados

La contaminación por metales pesados ha aumentado en el último tiempo y tiene impacto directos tanto en el ambiente como en la salud humana. Normalmente esta contaminación proviene de la industria principalmente asociado a la minería, metalúrgica e incineración [70].

#### Emisiones de GEI

El aumento del efecto de calentamiento global observado durante el siglo XX se debe, probablemente, con la confianza de un 90 %, a las crecientes concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera causados por el desarrollo acelerado de la sociedad humana [71].

#### Residuos Sólidos y Líquidos

Como se mencionó anteriormente en el marco teórico las centrales térmicas son intensivas en uso de agua y normalmente devuelven esta agua como residuos al ambiente con una temperatura superior a la cual fue extraída lo cual afecta a los organismos presentes en la zona, por otra parte existen métodos de generación que utilizan combustibles sólidos que generan residuos los cuales deben ser analizados a la hora tomar decisiones. Aquellos residuos no solo pueden causar daños al ecosistemas, sino también afectar gravemente a los habitantes de los alrededores del parque industrial [66].

#### Requerimiento de Tierras

Al utilizar grandes extensiones de terrenos para la generación de energía eléctrica se incurre en un costo de oportunidad asociado a la posible utilización de estos terrenos para otros usos, existen lugares en que los terrenos poseen un valor mayor a otros, un ejemplo de esto son los terrenos aledaños a grandes comunidades los cuales pueden poseer una variedad de usos asociados al beneficio de la comunidad [68].

## Impacto sobre la flora y fauna local

El impacto de los sedimentos de metales pesados no solo tiene efectos en la salud humana, gran cantidad de animales marinos especialmente los moluscos acumulan una gran cantidad de concentraciones de distintos metales, los cuales se alojan en sus hígados y estómagos provocando enfermedades graves dentro de ellos y en los animales que se encuentran en niveles superiores en la cadena trófica [72]. Por otra parte el requerimiento de agua por parte de las centrales térmicas y su posterior vuelta a las costas a temperaturas superiores posee efectos adversos para algas y microorganismos que habitan en la costa [73].

### 3.5.7. Criterios Económicos

Muchas veces en la evaluación de proyectos solo se evalúan los beneficios económicos que se obtienen directamente del funcionamiento del proyecto, pero existen otros beneficios indirectos que pueden ser generados para la comunidad y que deben ser analizados.

## Desarrollo Turístico

El turismo debe ser planeada y controlada adecuadamente, ya que puede ayudar a lograr la conservación del medio ambiente, sino, por el contrario, puede causar el deterioro del medio ambiente. Los planificadores de turismo tienen que tener en cuenta dos cuestiones medioambientales relacionadas. Una de ellas es la conservación de características ambientales importantes y el mantenimiento de la calidad medioambiental general de la zona. La otra es la prevención, o al menos la reducción al mínimo, de los problemas ambientales que pueden resultar de turismo [74].

## Tasas de Compensación

Las tasas de compensación se refieren a compensaciones dadas a la comunidad local afectada directamente por la instalación y operación de plantas de energía. Las tasas de compensación como objetivo restablecer la degradación de los pueblos de la calidad de vida [68].

## Costo Energético

La generación de energía basada en combustibles fósiles, en particular carbón presentan los costos más bajos, sin embargo, es el más contaminante combustible. Las energías renovables, por otro lado, no presentan ningún coste asociado a la fuente de energía, ya que está presente en la naturaleza. Sin embargo, su disponibilidad que intermitente y dependerá en: condiciones del clima, ubicación, etc., aumenta la energía los costos de generación [75].

## Uso de Agua

El agua es un elemento vital para todos los seres vivos, así como para muchos procesos industriales que las plantas de generación de energía tienen para su funcionamiento. Las plantas de generación de energía a partir de recursos convencionales tienen un alto nivel de consumo de agua durante el ciclo de producción, mientras que las energías renovables no convencionales tienen un consumo de agua [76].

## Aprovechamiento de Recursos Naturales

En la última década la disponibilidad de recursos energéticos renovables se ha convertido en un activo económico que podría generar el efecto positivo en la economía de la región en la que esos recursos están presentes. Beneficios de los recursos energéticos renovables han llamado mucho la atención de los académicos y profesionales sobre todo después de Protocolo de Kyoto [77].

## Disponibilidad Energética

A diferencia de las tecnologías convencionales (tal como carbón, gas, diésel e hidroeléctricas), la generación a través de ERNCI se caracteriza por ser variable y fuertemente dependiente de las condiciones climáticas diarias, por esto no pueden proveer electricidad de manera continua, por lo que requiere el complemento de otras tecnologías [78].

## Desarrollo Económico de la Zona

Debido al gran impacto que tienen algunos tipos de industrias en zonas con desarrollo económico basado principalmente en el consumo o utilización de recursos naturales un aspecto importante a analizar es como impacta el funcionamiento de la planta al desarrollo, no solo en el área turística, sino que también en la extracción de recursos [18].

## 4 | Análisis de Resultados

### 4.1. Análisis de Zonas Saturadas

Como se puede apreciar en la tabla 4.1 en la Zona Norte 4 de las 8 zonas saturadas presentan centrales térmicas en sus alrededores. Se destacan dos zonas, Huasco y Tocopilla. Ambas con una potencia total instalada superior a los 500 MW y ambas presentan Carbón como combustible en sus centrales.

**Tabla 4.1:** Centrales Térmicas asociadas a Zonas Saturadas en la Zona Norte

	Centrales Térmicas Cercanas	Combustible	Potencia(MW)	Potencia Total
Huasco	GUACOLDA	CARBÓN	610	701,8
	HUASCO	IFO 180	91,8	
Calama	NO posee centrales cercanas			
Andacollo	NO posee centrales cercanas			
Tocopilla	Diesel Tamaya	Fuel Oil 6	103,7	1382,7
	Tocopilla	C. Combinado	1001,7	
	Norgener	Carbón	277,3	
Chuquicamata	NO posee centrales cercanas			
Potrerillos	Emelda	Diesel	69,25	172,69
	El Salvador	Diesel	23,8	
	Diego de Almagro	Gas Natural/Diesel	23,8	
	Diego de Almagro	Diesel	55,84	
María Elena	NO posee centrales cercanas			
Paipote	Central Cardones	Diesel	153,04	268,33
	Cenizas	IFO 180	16,29	
	Termopacifico	Diesel	99	

Fuente: Elaboración Propia

La tabla 4.2 muestra que el 80 % de las zonas saturadas en la zona centro posee centrales de generación térmicas en sus cercanías, siendo la más afectada la localidad de Ventanas que incluye a las comunas de Concón, Quintero y Puchuncaví. La cual posee un total de generación térmica

superior a los 1000 MW y también presenta carbón como principal combustible para estas centrales.

**Tabla 4.2:** Centrales Térmicas asociadas a Zonas Saturadas en la Zona Centro

Zonas	Centrales Térmicas Cercanas	Combustible	Potencia(MW)	Potencia Total
Ventanas	Concón	Diésel	2,72	1179
	Quintero	GNL	298,78	
	Nueva Ventanas	Carbón	272	
	Ventanas	Carbón	333,5	
	Campiche	Vapor/Carbón	272	
R. Metropolitana	Renca	Diésel	100	100
Curicó	Planta Curicó	Carbón	2	55,57
	Teno	Diésel	53,57	
Talca y Maule	NO posee centrales cercanas			
Valle VI región	Esperanza	Diésel	22,09	318,09
	San Francisco de Mostazal	Diesel	24	
	Candelaria	Diésel	272	

Fuente: Elaboración Propia

Según la tabla 4.3 en la zona sur se presentan 2 zonas como las más propensas a contaminación debido a la presencia de centrales térmicas estas son el Gran Concepción y Los Angeles, aunque destaca entre ambos la zona de Concepción debido a que posee una capacidad de generación de 942.9 MW de potencia instalada y 720 del total están conformados con centrales a carbón.

#### 4.1.1. Elección Zonas Saturadas a Evaluar Según sus Recursos

Para la elección de las zonas saturadas a revisar se utilizaron dos criterios:

- Poseer una capacidad de generación térmica superior a 500 MW
- Entre los combustibles utilizados para la generación debe estar carbón.
- Mayor disponibilidad de recursos energéticos.

Según estos criterios existen 5 zonas que serán evaluadas en cuanto a la disponibilidad de recursos y la participación de los distintos combustibles en la capacidad de generación:

**Tabla 4.3:** Centrales Térmicas asociadas a Zonas Saturadas en la Zona Sur

Zonas	Centrales Termoeléctricas Cercanas	Combustible	Potencia(MW)	Potencia Total
Coyhaique	Tehuelche	Diésel	10,11	
Gran Concepción	ARAUCO	BIOMASA	24	942,9
	ESCUADRÓN	BIOMASA	14,2	
	ENERGÍA BIO BIO	BIOMASA	7,2	
	Santa María	Carbón	370	
	BOCAMINA II	Carbón	350	
	HORCONES	DIÉSEL	25	
	Coronel	DIÉSEL	55,8	
	PETROPOWER	PETCOKE	74,09	
Los Ángeles	ESCUADRÓN	Vapor	12,5	442,9
	JCE	Diesel	0,8	
	Santa Lidia	Diésel	132	
	Los Pinos	Diésel	92,1	
	Yungay	Diésel/GN	218	
Valdivia	Antilhue	Diésel	101,8	101,8
Temuco	EAGON	Diésel	3,2	3,2
Chillán	No posee centrales cercanas			
Osorno	Chuyaca	Diésel	12	17,6
	Southern Bulbs	Diésel	0,8	
	C.T. Polincay	Diésel	4,8	

Fuente: Elaboración Propia

## 4.1.2. Análisis de Capacidad de Generación Actual

### Tocopilla

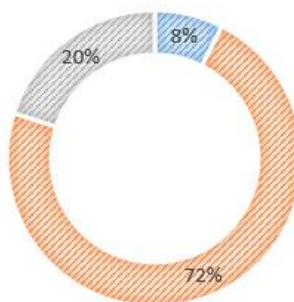
Se puede apreciar en la tabla 4.4 que en la zona de Tocopilla existen 3 centrales de generación térmica. Las cuales en total poseen una capacidad de generación de 1387.2 MW. La más importante es una central de ciclo combinado que utiliza distintos combustibles entre ellos Fuel Oil 6, Gn, Diesel y Carbón, todos altamente contaminantes.

**Tabla 4.4:** Centrales de Generación Térmica en Tocopilla

	Nombre Central	Combustible	Potencia (MW)
	Diésel Tamaya	Fuel Oil 6	103,7
Tocopilla	Tocopilla	Fuel Oil 6/GN/Diesel/Carbón	1001,7
	Norgener	Carbón	277,3

A continuación en la fig 4.1 se muestra un gráfico con la participación del tipo de combustible en la capacidad de generación de la zona.

■ Fuel Oil 6 ■ Fuel Oil 6/GN/Diesel/Carbón ■ Carbón



**Figura 4.1:** Participación por tipo de combustible en la capacidad de generación de la zona.

*Fuente:* Elaboración Propia.

## Mejillones

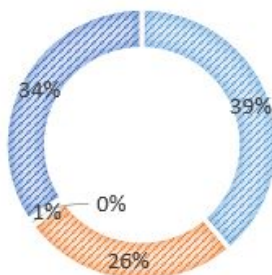
Actualmente en la zona de Mejillones existen 7 centrales de generación térmica. Como se aprecia en la figura 4.2 el carbón es el principal combustible, teniendo el 39 % de la producción de energía, seguido por el gas natural el cual tiene 34 % de la participación en cuanto a capacidad instalada.

**Tabla 4.5:** Centrales de Generación Térmica en Mejillones

Central	Combustible	Capacidad Instalada (MW)
HORNITOS	CARBÓN	170,1
TERMOELÉCTRICA ANDINA	CARBÓN	168,8
TERMOELÉCTRICA ANGAMOS	CARBÓN	545
TERMOELÉCTRICA MEJILLONES	CARBÓN/GAS NATURAL	591,7
PLANTA DE H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> MEJILLONES	COGENERACIÓN	17,5
DIÉSEL ENAEX	DIÉSEL	2,7
ATACAMA	GAS NATURAL	780
Capacidad Total		2275,8

*Fuente:* Elaboración Propia.

■ Carbón ■ Ciclo Combinado ■ Cogeneración ■ Diesel ■ Gas Natural



**Figura 4.2:** Participación por tipo de combustible en la capacidad de generación de la zona.

*Fuente:* Elaboración Propia.

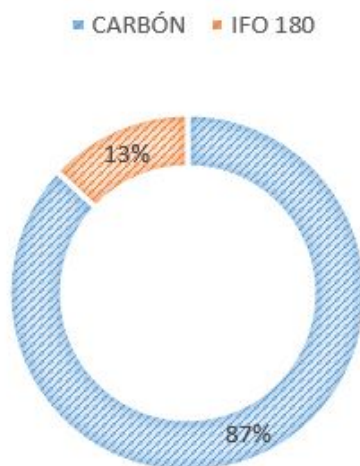
## Huasco

En la ciudad de Huasco existen dos centrales de generación térmica con una capacidad total de 701,8 MW. Como se aprecia en la figura 4.3 el carbón es el principal combustible concentrando el 87% de la participación en cuanto a capacidad instalada.

**Tabla 4.6:** Centrales de Generación Térmica en Huasco

Nombre	Combustible	Capacidad Instalada (MW)
GUACOLDA	CARBÓN	610
HUASCO	IFO 180	91,8
Capacidad Total		701,8

*Fuente:* Elaboración Propia.



**Figura 4.3:** Participación por tipo de combustible en la capacidad de generación de la zona.

*Fuente:* Elaboración Propia.

### Concón, Puchuncaví y Quinteros

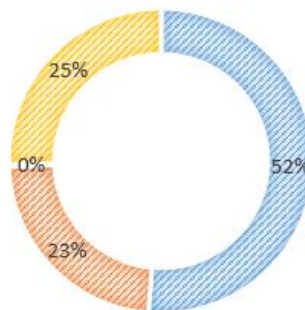
En las localidades de Concón, Puchuncaví y Quinteros existen 5 centrales de generación térmica con una capacidad total de 1179 MW. Como se aprecia en la figura 4.4 el carbón es el principal combustible concentrando el 52 % de la participación en cuanto a capacidad instalada. Por otra parte suma participación a través de la central de ciclo combinado Campiche que utiliza a la vez Carbón y vapor para generar electricidad.

**Tabla 4.7:** Centrales de Generación Térmica en Concón, Puchuncaví y Quinteros

Centrales Termoeléctricas Cercanas	Combustible	Potencia(MW)
Concón	Diésel	2,72
Quintero	GNL	298,78
Nueva Ventanas	Carbón	272
Ventanas	Carbón	333,5
Campiche	Vapor/Carbón	272
Capacidad Total		1179

*Fuente:* Elaboración Propia.

■ Carbón ■ Ciclo Combinado (Vapor/Carbón) ■ Diesel ■ Gas Natural



**Figura 4.4:** Participación por tipo de combustible en la capacidad de generación de la zona.

*Fuente:* Elaboración Propia.

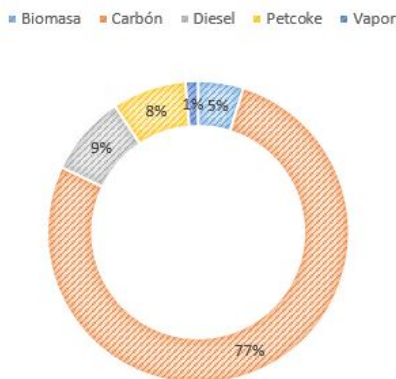
## Gran Concepción

En las localidades incluidas en la zona del Gran Concepción existen 9 centrales de generación térmica con una capacidad total de 932,79 MW. Como se aprecia en la figura 4.5 el carbón es el principal combustible concentrando el 77% de la participación en cuanto a capacidad instalada. Por otra parte se destaca la utilización de Biomasa en la generación eléctrica aunque la capacidad de generación solo representa el 5% del total, pero es un buen indicio a la hora de utilizar ERNC.

**Tabla 4.8:** Centrales de Generación Térmica en la Zona del Gran Concepción

Nombre	Combustible	Capacidad Instalada (MW)
ARAUCO	BIOMASA	24
ESCUADRÓN	BIOMASA	14,2
ENERGÍA BIO BIO	BIOMASA	7,2
Santa María	Carbón	370
BOCAMINA II	Carbón	350
HORCONES	DIÉSEL	25
Coronel	DIÉSEL	55,8
PETROPOWER	PETCOKE	74,09
ESCUADRON	Vapor	12,5
Capacidad Total		932,79

*Fuente:* Elaboración Propia.



**Figura 4.5:** Participación por tipo de combustible en la capacidad de generación de la zona.

*Fuente:* Elaboración Propia.

### 4.1.3. Análisis de recursos

Utilizando el explorador de energía solar y eólica de la Universidad de Chile se aprecia que la zona con mayor disponibilidad de recurso es Mejillones en la cual se pueden instalar los cuatro tipos de centrales analizadas en este estudio.

**Tabla 4.9:** Disponibilidad de Recurso en Zonas de Alta Contaminación

	Mejillones	Coronel-Lota	Huasco	Tocopilla	Ventanas
Wind OnShore(m/s)	7,8	8,7	7,7	7,8	5,5
Wind OffShore (m/s)	6,9	7,6	5,1	5,1	6,8
Global Irradiance (KW/m <sup>2</sup> *day)	6,11	4,52	4,81	6,67	4,91

Fuente: Elaboración Propia

## 4.2. Implementación de Guia para la Evaluación de Centrales de Generación en Zonas de Alta Contaminación

Debido a que la zona de Mejillones es la que concentra un mayor potencial de generación en cuanto a centrales térmicas a carbón, además considerando la disponibilidad de recurso en las zonas se elige a Mejillones como la zona para aplicar este trabajo.

### 4.2.1. Características de la Zona

La comuna de Mejillones se encuentra en el norte de Chile, en la región de Antofagasta. Ubicada a 65 km al norte de la ciudad de Antofagasta, tiene una superficie de 3.803 km<sup>2</sup>. Es una comuna que tiene límite con el Océano Pacífico al oeste, por lo cual gran parte de la contaminación ambiental afecta directamente al ecosistema marino.

El desarrollo económico en la comuna viene dado principalmente por la presencia del puerto instalado desde la época en que Chile era un gran exportador de salitre. El auge industrial en la zona se da desde la década de los 90, como alternativa a la crisis pesquera de la época. Se instalaron centrales termoeléctricas, fábrica de explosivos Enaex, Interacid (exportadora de ácido sulfúrico y azufre), además de cementos Polpaico. Se debe considerar como factor importante en la contaminación la actividad minera y el transporte ferroviario los cuales constituyen el eje del desarrollo industrial de la región. Producto de la actividad de las industrias los efectos negativos son apreciados por la población día a día, especialmente la contaminación del agua producto de la actividad de las

industrias pesqueras, las cuales también emiten malos olores, aumentado por el manejo de ácido sulfúrico en la zona, explosivos, cemento y la producción de energía por parte de las centrales termoeléctricas.



**Figura 4.6:** Mapa de Mejillones y ubicación de sus centrales térmicas  
*Fuente:* CNE 2016.



**Figura 4.7:** Mapa de Mejillones y ubicación de sus industrias  
*Fuente:* Universidad de Antofagasta 2012.

De acuerdo a un estudio de la Universidad de Antofagasta del año 2012, en los sedimentos marinos del sector industrial se registran niveles de metales pesados (níquel, cobre, zinc, cadmio, vanadio y plomo) que superan con creces la norma internacional. Los cuales afectan varias especies de crustáceos y moluscos. [26] Los cuales superan con creces las normativas de referencia internacional, esto debido a que en Chile no se aplican normas en sedimentos marinos. Esto es de suma importancia debido a la presencia de metales pesados en tejidos blandos en los organismos muestreados por el mismo estudio, los cuales entregaron resultados que en varios organismos se supera la norma

que impone el Reglamento Sanitario de los Alimentos <sup>24</sup> el cual solo permite de 20mg/kg para la sumatoria de zinc, hierro y cobre. En la tabla 4.10 se muestran los valores de concentración de metales obtenidos para las estaciones cercanas a las centrales térmicas y un nivel base ubicado alejado del sector industrial.

**Tabla 4.10:** Concentración de Metales Pesados en la Zona

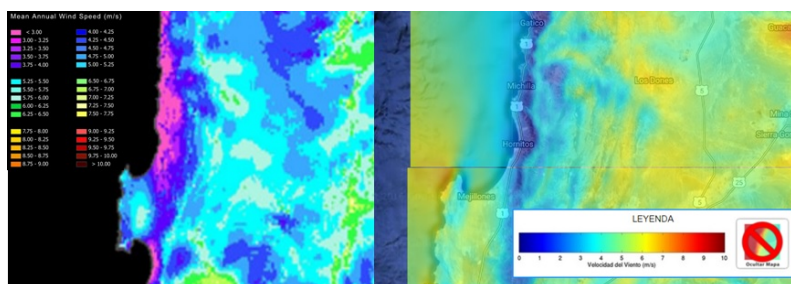
Central Cercana	Estación de Monitoreo	Especie Analizada	V	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Mo	Cd	Hg	As	Se	Tl	Pb
Hornitos	Estación 5	Aulacomya ater (chica)	44	0	3	15	3	18	39	4	22	0	3	1	1	1
		Eurypodius latreillei	15	0	1	18	52	11	23	5	0	0	5	1	22	18
	Estación 3	Glacilaria sp	28	0	3	70	8	4	12	3	1	0	5	1	3	3
Mejillones y Andina	Estación 8	Cancer plebejus y Cancer setosus	14	0	0	20	9	15	35	4	1	0	6	1	1	2
Angamos	Estación 10	Cancer plebejus	21	0	2	28	3	1,5	18	3	2	0	3	1	0	2
	Control	Cancer plebejus y Murcia gaudichaudi	7	0	0	1	3	2,5	16	3	1	1	4	1	1	2
	Norma USA						21	34	150		1					47
	Norma Comercial							10	100				2	0		2

Fuente: Elaboración Propia

## 4.2.2. Disponibilidad de Recursos

### Disponibilidad de Recurso Eólico

La evaluación de recurso eólico se realizó mediante la utilización del Explorador de Energía Eólica de la Universidad de Chile, los resultados obtenidos de la disponibilidad de recursos se pueden apreciar en la figura 4.8



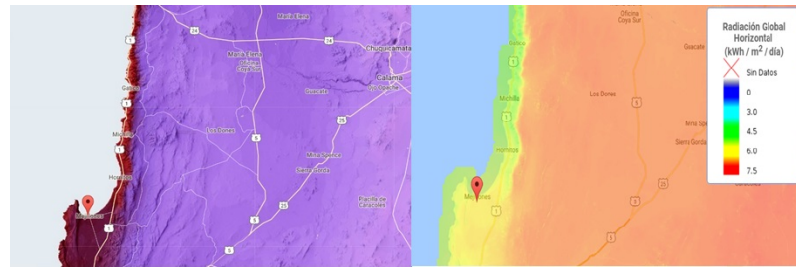
**Figura 4.8:** Disponibilidad de Recurso Eólico.

Fuente: Explorador de Energía Eólica. .

### Disponibilidad de Recurso Solar

La evaluación de recurso solar se realizó mediante la utilización del software SolarGis en conjunto con el Explorador de Energía Solar de la Universidad de Chile, los resultados obtenidos de la disponibilidad de recursos se pueden apreciar en la figura 4.9

<sup>24</sup>Decreto Supremo 977/96



**Figura 4.9:** Disponibilidad de Recurso de Solar.

*Fuente:* SolarGis, Explorador de Recurso de Energía Solar.

Se aprecia que en la comunidad de Los Dones existe un potencial Solar, el cual puede ser aprovechado. El lugar escogido se encuentra a una distancia en línea recta de 30 km de la ciudad de Mejillones. En cuanto al recurso Eólico se puede apreciar en los mapas que la variabilidad que presentan estos en las zonas cercanas a Mejillones es muy alta lo cual no hace posible la instalación de una central eólica en tierra. Por otra parte existe una zona ubicada en la costa de Mejillones que destaca por presentar un potencial Eólico de 7.7 m/s como media anual.

### 4.2.3. Análisis de Disponibilidad Técnica

#### Profundidad del Suelo Marino

Se puede apreciar en la figura 4.10 que la profundidad del suelo marino avanza muy rápidamente mientras se aleja de la costa, se aprecia además que a la distancia mínima recomendada para la instalación de una central (10 km) la profundidad del suelo marino alcanza una profundidad muy superior a los 300 m, por lo tanto la instalación de una central eólica offshore debe ser realizada mediante soportes flotantes .



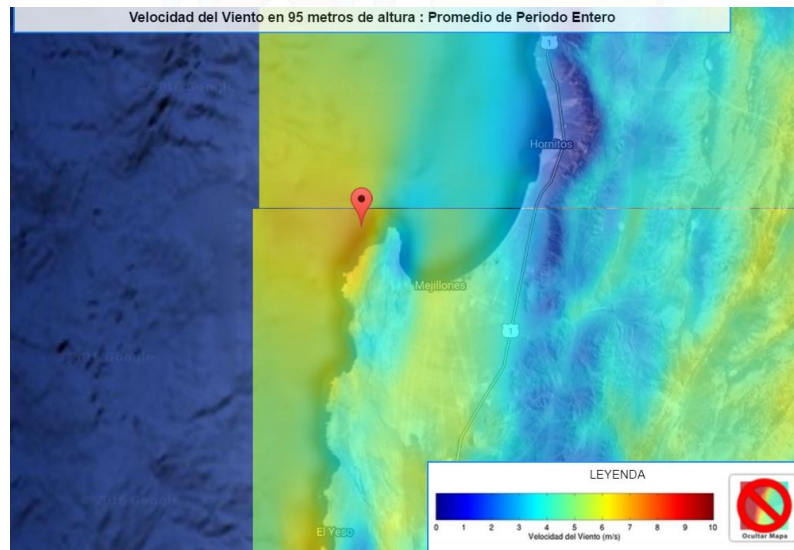
**Figura 4.10:** Disponibilidad de Recurso Eólico.

*Fuente:* Explorador de Energía Eólica. .

#### 4.2.4. Zona de Evaluación de Centrales

##### Central Eólica Offshore

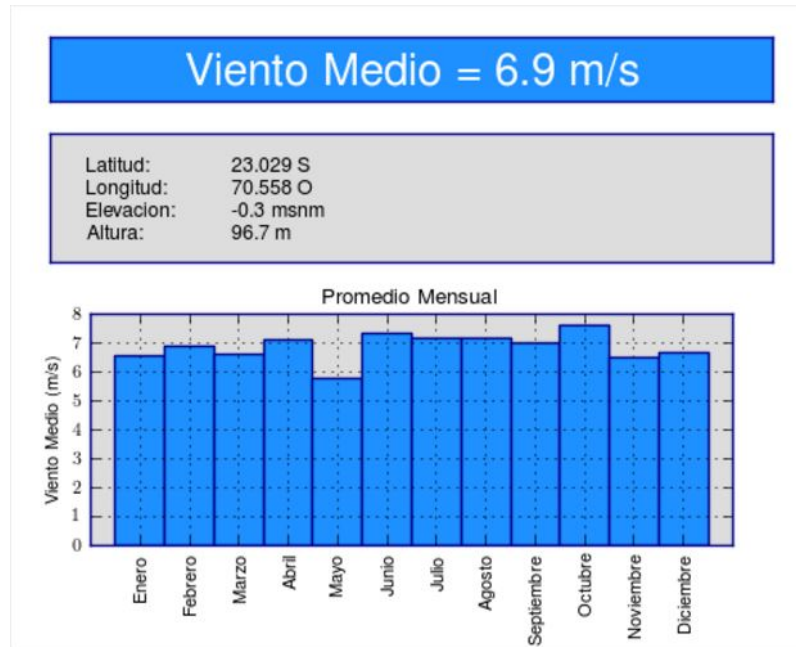
Luego del análisis realizado se observa que existe una zona con disponibilidad de recurso suficiente para la instalación de una central off shore, la zona seleccionada se puede apreciar en la figura 4.11.



**Figura 4.11:** Disponibilidad de Recurso Eólico.

*Fuente:* Explorador de Energía Eólica. .

La disponibilidad de recursos en la zona se puede apreciar en la figura 4.12

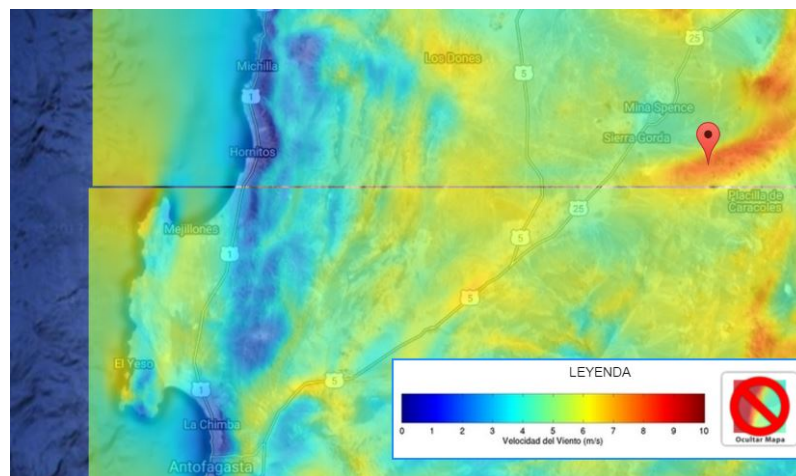


**Figura 4.12:** Disponibilidad de Recurso Eólico.

*Fuente:* Explorador de Energía Eólica. .

### Central Eólica Onshore

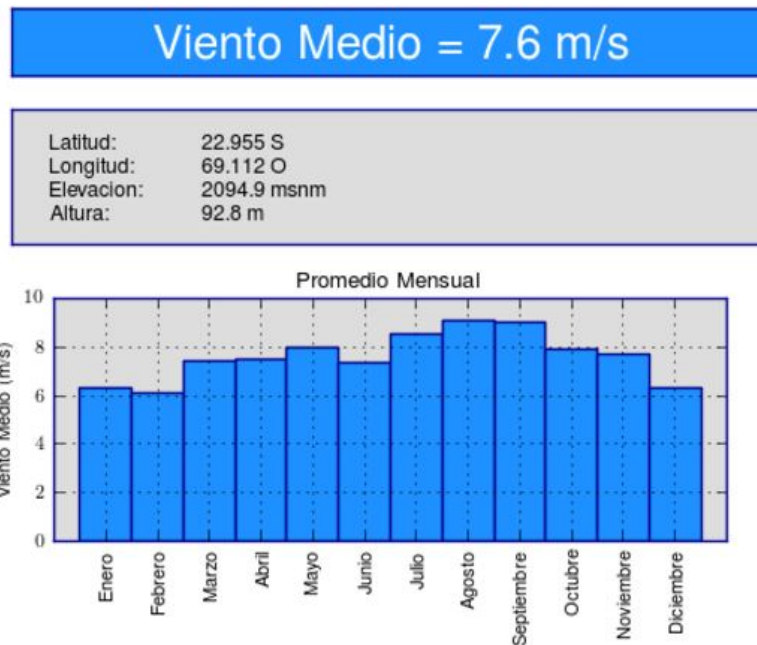
Luego del análisis realizado se aprecia que en la zona de Sierra Gorda existe una zona con recurso suficiente para la instalación de una central eólica Onshore, esta zona puede apreciarse en la figura 4.13.



**Figura 4.13:** Disponibilidad de Recurso Eólico.

*Fuente:* Explorador de Energía Eólica. .

La disponibilidad de recursos en la zona se puede apreciar en la figura 4.14

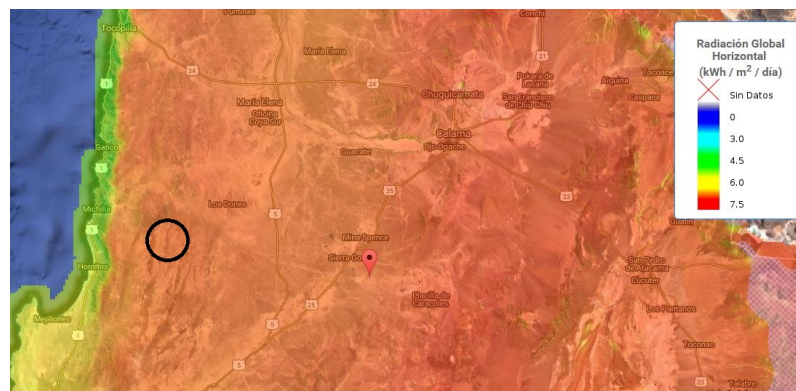


**Figura 4.14:** Disponibilidad de Recurso Eólico.

*Fuente:* Explorador de Energía Eólica.

### Centrales Solares

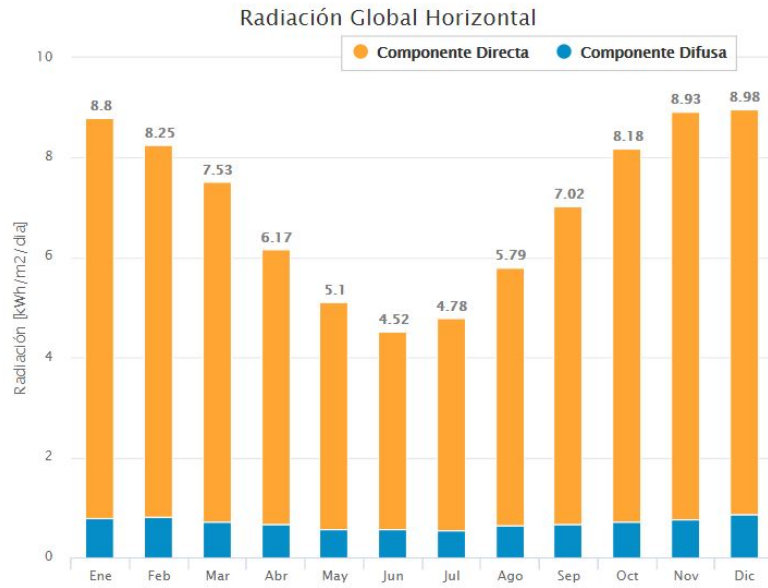
La zona seleccionada para la evaluación de centrales se muestra en la figura 4.15.



**Figura 4.15:** Mapa de Zona Seleccionada

*Fuente:* Explorador de Energía Solar.

A continuación se muestran los gráficos con la información del recurso solar obtenida del Explorador de Recurso Solar:



**Figura 4.16:** Disponibilidad de Recurso Solar Mensual

*Fuente:* Explorador de Energía Solar.

En la figura 4.17 se muestra la curva de evolución diaria de la generación de energía. Se aprecia que a partir de las 7 am comienza la producción de energía, generando un 10 % del potencial para aumentar hasta un 35 % una hora más tarde y seguir con un ascenso sostenido hasta alcanzar un pico de generación de un 75 % a las 12 horas. Desde este punto comienza a disminuir la generación de la misma forma en que aumentó durante las primeras horas del día, dos hora más tarde se tiene un potencial de aproximadamente el 68 % de generación, descendiendo hasta un aproximado de un 54 % a las 15 horas. La generación de energía vuelve a su punto mínimo a las 18 horas.

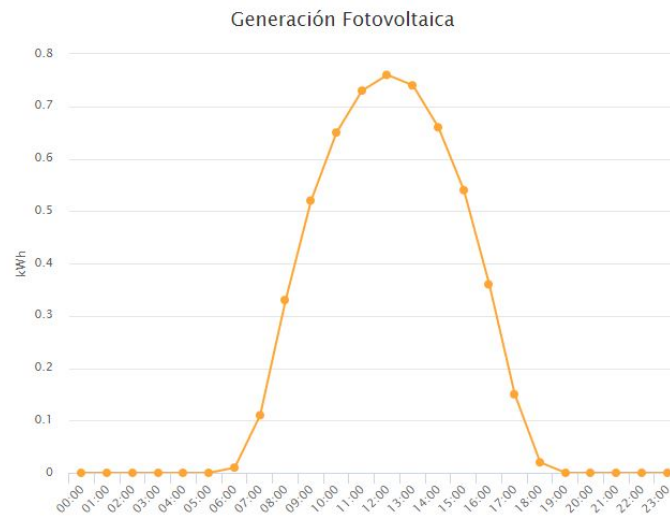


Figura 4.17: Ciclos medios de potencia de un sistema fotovoltaico durante un día

Fuente: Explorador de Recurso de Energía Solar.

#### 4.2.5. Tamaño de las centrales

Utilizando el modelo de programación lineal entera descrito anteriormente se realizaron una serie de iteraciones en las cuales se varía el requerimiento mínimo de energía entregada al sistema por hora de operación sujeto a una base de generación fija de 500 MW de capacidad instalada total. Por otra parte se ajustaron restricciones para la utilización de todos los recursos de la zona. Los resultados obtenidos se aprecian en la tabla 4.11

Tabla 4.11: Distribución Óptima de Capacidad Instalada Según Requerimientos de Generación

Max 500 MW						
Req Energía (MW)	Hrs Cubiertas	% Cubierto	Capacidad Instalada (MW)			
			Off Shore	On Shore	Solar PV	Solar CSP
100	7997	91 %	98,5	104	200	97,5
125	7623	87 %	42,5	136	200	121,5
150	7066	81 %	25	129,5	200	145,5
175	6757	77 %	25	100	200,5	174,5
200	6170	70 %	25	100	200	175
225	5131	59 %	25	100	200	175
250	4297	49 %	25,5	100	200	174,5

Fuente: Elaboración Propia

Al revisar los resultados obtenidos se aprecia que existen 4 combinaciones posibles con distintos porcentajes de horas cubiertas por sobre el nivel mínimo de energía requerido. Se aprecia que a

medida que aumenta el requerimiento aumenta la capacidad instalada de la central Solar CSP la cual es la que presenta un mayor costo en cuanto a operación y nivel de inversión. Por lo que para tomar una decisión por sobre una combinación óptima será necesario realizar una evaluación económica de cada una de las alternativas.



## 4.3. Evaluación Económica:

A continuación y a modo de ejemplo se muestra la evaluación de una de las configuraciones óptimas entregadas por el modelo, en este caso se ha evaluado la configuración que busca reemplazar un requerimiento mínimo de 125 MW. Al final de esta sección se mostrará una tabla resumen con los resultados de todas las combinaciones evaluadas.

### 4.3.1. Central Eólica Onshore

Del explorador se pueden obtener los datos de generación para un aerogenerador según la posición geográfica, el modelo del aerogenerador y la altura a la que se espera evaluar la disponibilidad del recurso. Para la evaluación de la central eólica se evaluaron distintos modelos de aerogeneradores, obteniéndose los siguientes resultados.

**Tabla 4.12:** Evaluación de Modelos de Aerogeneradores para Distintas Alturas con Respecto a su Potencial de Generación Promedio Anual en KW.

Modelo/Altura	46[m]	56 [m]	68 [m]	76 [m]	92 [m]	122 [m]
Vestas V110 - 2.0 MW	906,7	1070	1053	1029,9	997	890
Unison U93	824	823	807,2	786,5	734,9	628
Siemens SWT-2.3-93	998	993	961	934	882	780
Siemens SWT-2.3-113	1254	1250,7	1231	1211	1156	1075

Fuente: Elaboración Propia

A partir de estos resultados se aprecia que la elección óptima sería utilizar el modelo Siemens SWT-2.3-113 a una altura de 46 metros, pero se debe considerar que la altura de la torre de soporte ideada para este tipo de aerogenerador es de mínimo 80 metros y el diámetro de las aspas es de 113 metros, por lo tanto la altura a evaluar será la de 92 [m], por otra parte se considerarán los dos aerogeneradores con mayor potencia para hacer una evaluación mensual de su potencial de generación.

Según los resultados entregados y debido a su mayor capacidad de generación el aerogenerador utilizado para evaluar este tipo de central será el modelo Siemens.

El proyecto definido para la instalación de este tipo de central y sus principales datos están resumidos en la tabla 4.14.

Los niveles de inversión necesarios y sus principales componentes se pueden apreciar en la tabla 4.15

**Tabla 4.13:** Potencial de Generación Mensual Promedio en KW

Mes/Modelo	Siemens SWT-2.3-113	Vestas V110 - 2.0 MW
Enero	921	777,1
Febrero	881	742,4
Marzo	1174,9	1005,2
Abril	1184,9	1014,8
Mayo	1231,7	1054,7
Junio	1100,9	936,6
Julio	1302,2	1114,2
Agosto	1404,1	1205,9
Septiembre	1440	1240,1
Octubre	1262,5	1081,1
Noviembre	1214,4	1040,3
Diciembre	879,3	737,8
Media	1168	997,3

Fuente: Elaboración Propia

**Tabla 4.14:** Datos técnicos instalación central eólica onshore

Localización	Sierra Gorda
Vida Útil (Años)	30
Capacidad Instalada (MW)	135,7
Número de Aerogeneradores	59
Potencia Unitaria (MW)	2,3

**Tabla 4.15:** Nivel de inversión necesaria instalación central eólica onshore

Inversión Total (USD)	100 %	\$ 312.110.000,00
Turbina (USD)	75 %	\$ 234.082.500,00
Conexión a la red (USD)	12 %	\$ 37.453.200,00
Construcción (USD)	8 %	\$ 24.968.800,00
Otros Costos (USD)	5 %	\$ 15.605.500,00

### 4.3.2. Central Eólica Offshore

El proyecto definido para la instalación de este tipo de central y sus principales datos están resumidos en la tabla 4.16.

**Tabla 4.16:** Datos técnicos simulación eólica offshore

Localización	Sierra Gorda
Vida Útil (Años)	30
Capacidad Instalada (MW)	43,7
Número de Aerogeneradores	19
Potencia Unitaria (MW)	2,3

Los niveles de inversión requeridos y sus principales componentes se aprecian en la tabla 4.17:

**Tabla 4.17:** Niveles Inversión Central Eólica Offshore

Inversión Total (USD)	100 %	\$ 170.430.000
Turbina (USD)	45 %	\$ 76.693.500
Conexión a la red (USD)	25 %	\$ 42.607.500
Construcción (USD)	20 %	\$ 34.086.000
Otros Costos (USD)	10 %	\$ 17.043.000

### 4.3.3. Central Fotovoltaica

Como se mencionó en la metodología para la evaluación de las centrales se utilizó el software SAM-NREL para obtener el nivel de energía generado y los costos asociados al funcionamiento de la central. Con estos datos obtenidos se calcularon los beneficios generados por el no uso de la central a carbón, los cuales fueron considerados como los verdaderos ingresos de la central y no la venta de energía al sistema.

En la tabla 4.18 se muestran los datos técnicos más relevantes que fueron evaluados.

**Tabla 4.18:** Datos técnicos de la simulación fotovoltaica

Localización	Sierra Gorda
Vida Útil (Años)	30
Capacidad Instalada (MW)	200
Número de Paneles	815.588
Potencia Unitaria (KW)	2,45E-01

Fuente: Elaboración Propia

El nivel de inversión necesario para instalar la central se puede apreciar en la tabla 4.19, en ella se aprecia la información con respecto al desglose del nivel de inversión, se puede apreciar que los paneles solares concentran el 28 % de la inversión total, siendo estos el valor más alto y los cuales han reducido su valor considerablemente a través de los años y se espera que sigan reduciendo su precio, por lo tanto se puede esperar que el nivel de inversión para este tipo de centrales disminuya, por otra parte el balance de la planta considera casi un 20 % del total de la inversión presentándose como el segundo costo en importancia.

### 4.3.4. Central CSP

Al igual que la central fotovoltaica la Central CSP fue evaluada mediante el software SAM-NREL con el fin de obtener los niveles de inversión necesarios y los costos de funcionamiento de la planta, para luego ser llevados estos en un flujo de caja que incluye los costos de generación por la central a carbón que dejaría de funcionar como los ingresos de la central CSP. Los datos más relevantes de la evaluación se muestran en la tabla 4.20

El nivel de inversión obtenido para la central CSP se concentra principalmente en el campo de heliostatos teniendo estos una participación del 31 % del nivel de inversión total, el segundo costo más importancia se encuentra en el ciclo de potencia a utilizar el cual concentra el 13 % del nivel total de inversión.

**Tabla 4.19:** Nivel de Inversión en Central Fotovoltaica

Inversión Total (USD)	100 %	\$ 420.000.000
Paneles (USD)	28 %	\$ 118.603.082
Inversores (USD)	7 %	\$ 27.758.169
<b>Total Equipos (USD)</b>	<b>35 %</b>	<b>\$ 146.361.251</b>
Balance (USD)	19 %	\$ 80.751.030
Instalación (USD)	11 %	\$ 47.945.926
Instalador (USD)	10 %	\$ 40.375.515
<b>Total Obras Civiles (USD)</b>	<b>40 %</b>	<b>\$ 169.072.472</b>
<b>Contingencias (USD)</b>	<b>5 %</b>	<b>\$ 22.080.361</b>
<b>Costos de capital Indirectos (USD)</b>	<b>16 %</b>	<b>\$ 65.610.213</b>

Fuente: Elaboración Propia

**Tabla 4.20:** Datos Técnicos Evaluación de Central CSP

Localización	Sierra Gorda
Vida Útil (Años)	30
Capacidad Instalada (MW)	121.5
Múltiplo Solar	5
Horas Almacenamiento	20
Producción de Energía Anual (MWh)	2,95E+06

Fuente: Elaboración Propia

**Tabla 4.21:** Nivel de Inversión en Central CSP

<b>Inversión Total</b>	<b>\$ 1.193.859.000</b>	<b>100 %</b>
Heliostatos	\$ 366.997.508	31 %
Recibidor	\$ 87.556.324	7 %
<b>Total Equipos</b>	<b>\$ 454.553.832</b>	<b>38 %</b>
Preparación de Terreno	\$ 34.540.942	3 %
Torre	\$ 100.162.715	8 %
Almacenamiento	\$ 160.509.740	13 %
Balance	\$ 43.238.851	4 %
Ciclo de Potencia	\$ 151.335.985	13 %
<b>Total Obras Civiles</b>	<b>\$ 489.788.233</b>	<b>41 %</b>
Contingencias	\$ 83.570.130	7 %
<b>Costos de capital Directos</b>	<b>\$ 1.010.446.010</b>	<b>85 %</b>
<b>Costos de capital Indirectos</b>	<b>\$ 183.412.990</b>	<b>15 %</b>

Fuente: Elaboración Propia

A continuación se muestra la información resumida de los resultados económicos para las dos centrales evaluadas:

Se realiza un flujo de caja con todos los datos ingresados, y se obtienen los valores para el VAN, TIR y Payback 4.22, considerando una tasa de descuento del 10 %:

**Tabla 4.22:** Resultados Evaluación Económica

	Indicadores	Solar PV	Eólica Off Shore	Eólica	Solar CSP
Técnicos	FP	37 %	38 %	35 %	80 %
Económicos	Inversión	\$ 420.000.000	\$ 170.430.000	\$ 312.110.000	\$ 1.193.859.000
	VAN	\$ 70.835.219	-\$ 14.910.091	-\$ 29.583.181	-\$ 332.387.420
	Payback	6 Años	24	20	26
	IVAN	0,17	No Aplica	No aplica	No Aplica
	Tir	15,29 %	6,36 %	6,75 %	3,52 %

Fuente: Elaboración Propia

S

## Resumen de Resultados

En la tabla 4.23 se muestran los resultados económicos para cada una de las configuraciones óptimas entregadas por el modelo.

**Tabla 4.23:** Resultados económicos

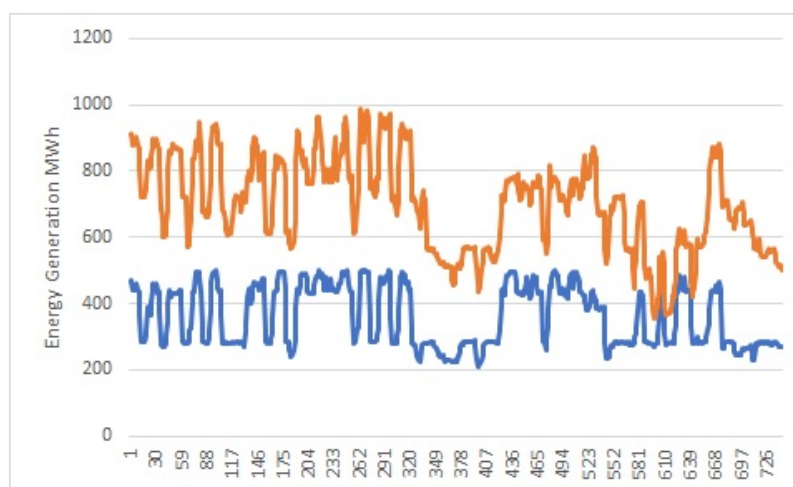
Req Min (MW)	Horas sobre nivel	% de Horas sobre nivel	OffShore	OnShore	Solar PV	Solar CSP	VAN MUS\$
(1) 100	7997	0,91	98,5	104	200	97,5	-\$ 100.110
(2) <b>125</b>	<b>7623</b>	<b>0,87</b>	<b>42,5</b>	<b>136</b>	<b>200</b>	<b>121,5</b>	<b>-\$ 41.345</b>
(3) <b>150</b>	<b>7066</b>	<b>0,81</b>	<b>25</b>	<b>129,5</b>	<b>200</b>	<b>145,5</b>	<b>-\$ 56.450</b>
(4) 175	6757	0,77	25	100	200,5	174,5	-\$ 79.110
(5) 200	6170	0,70	25	100	200	175	-\$ 79.110
(6) 225	5131	0,58	25	100	200	175	-\$ 79.110
(7) 250	4297	0,49	25,5	100	200	174,5	-\$ 79.110

Resultados económicos de las configuraciones óptimas, capacidad instalada de cada central en MW

## 4.4. Selección de Alternativa

Posteriormente al análisis económico de las alternativas existentes se deben definir los criterios de selección para decidir que alternativa será la evaluada con los criterios sociales en la evaluación social costo-beneficio y comparada con la situación actual mediante la evaluación multi-criterio. Para definir los parámetros de decisión se toman en cuenta aspectos relevantes de la zona en que se está trabajando, en este caso el norte grande y específicamente en su sistema interconectado, el SING.

El reemplazo de una central de generación a carbón del sistema interconectado central no es posible realizarlo mediante un análisis de la potencia real entregada, esto debido a que la potencia que entrega la central al sistema tiene una planificación mensual y la inyección de energía varía continuamente, a continuación en la figura 4.18 se aprecia la comparación de la inyección de energía por parte de la central termoeléctrica Mejillones para el primer mes del año en forma horaria.



**Figura 4.18:** Potencia inyectada al sistema central Mejillones

*Fuente:* Elaboración Propia

Otro aspecto relevante a tener en cuenta es la conformación del SING el cual en un 99 % está conformado por centrales térmicas, de las cuales más del 45 % son centrales a carbón, las cuales

poseen una lenta entrada al sistema, es decir tardan en llegar a su pick de generación. [54]

Considerando estos dos aspectos y adicionalmente los resultados a obtener del modelo de optimización planteado se definen 4 criterios para realizar la selección de la configuración óptima a ser instalada en la zona a evaluar.

- Porcentaje de horas sobre el nivel mínimo requerido.
- Nivel mínimo requerido.
- Resultado económico de la configuración óptima a evaluar.
- La ventana de baja en la generación se concentre en un solo período de tiempo.

Los primeros tres criterios responden a situaciones que son generales a cualquier sistema de generación, debido a que buscan reemplazar el máximo posible de energía de una central en particular, el cuarto criterio es utilizado con el fin de disminuir la puesta en marcha de centrales Diesel que poseen un alto costo por MWh generado respectivamente.

Considerando los criterios mencionados y los resultados mostrados en la tabla 4.23 la elección de la alternativa óptima a evaluar es la configuración 2, que reemplaza un total de 125 MW en el 87 % del total de las horas posibles y posee un VAN Económico de MMUS\$ -41.345.

## 4.5. Gráficos de Generación

A partir de los resultados obtenidos de la evaluación de centrales y la selección de la configuración 2 como la alternativa de generación apropiada para la zona de Mejillones se realiza la construcción de los gráficos de generación. En la figura 4.19 se aprecia el gráfico de distribución de generación por tecnología, como promedio de participación diario para los doce meses del año.

Se aprecia en la figura 4.19 que la generación promedio diaria es medianamente constante a lo largo del año, esto se debe principalmente al aumento de energía generada por parte de las centrales eólicas durante los meses comprendidos en el período Abril-Noviembre lo que ayuda a contrarrestar las bajas de generación de las centrales solares que durante los mismos períodos tienen su menor producción de energía. Por otra parte se aprecia en la participación en la generación mensual que en los meses de julio y agosto la producción de energía por parte de las centrales eólicas supera en porcentaje su capacidad instalada, esto se debe a la reducción de generación por parte de las solares. Por otra parte se destaca que la participación de la central Solar CSP mantiene un nivel de generación estable y esto se debe a su gran factor de planta y al múltiplo solar con que fue evaluada esta central.

La figura 4.20 Muestra la distribución de generación por hora para un día promedio en cada uno de los trimestres del año.

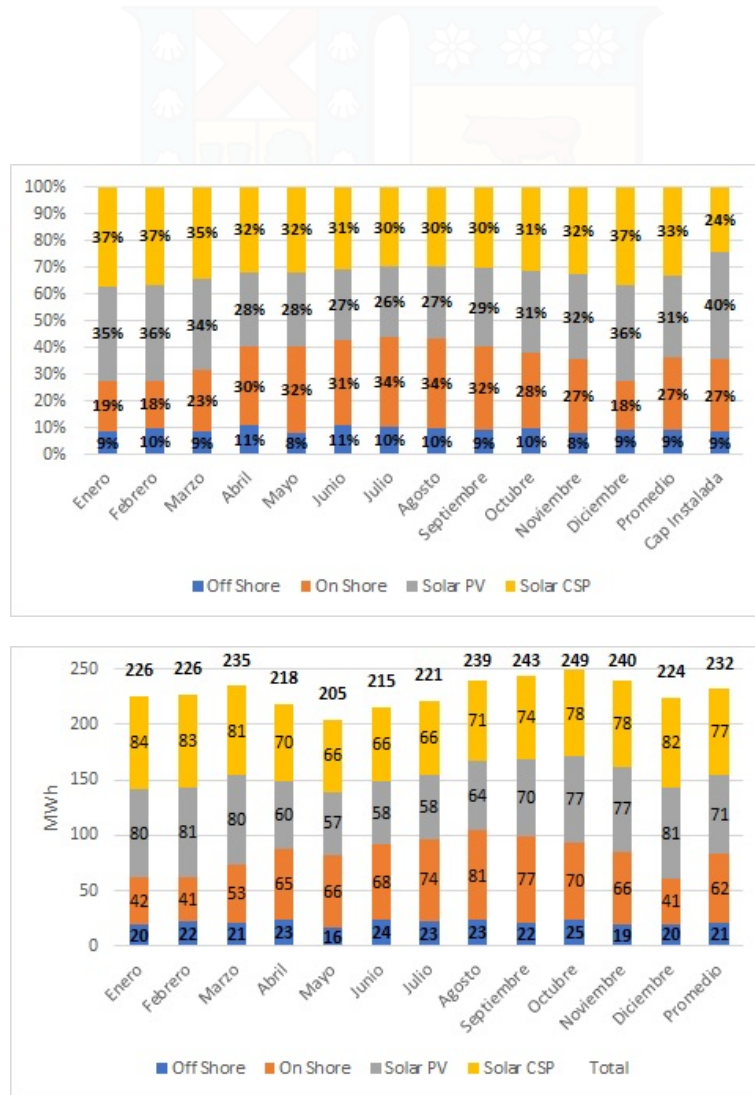
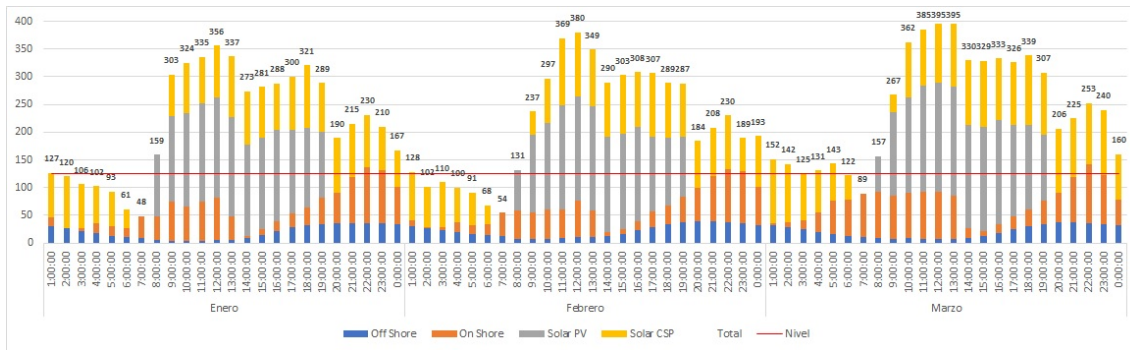
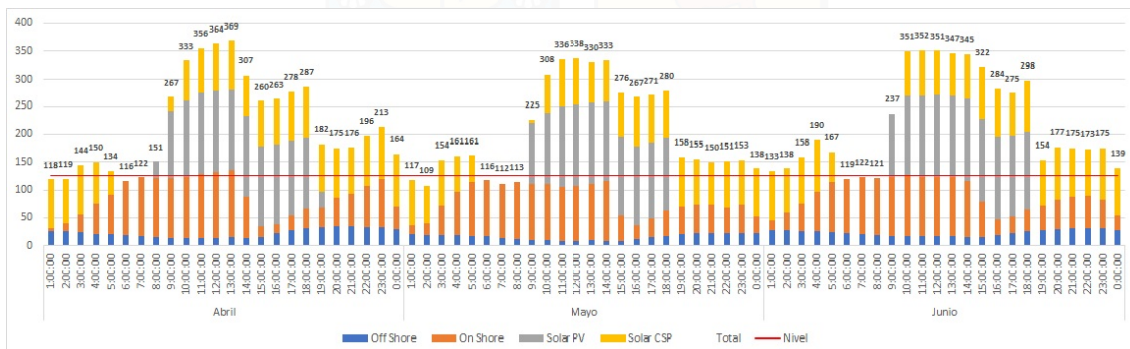


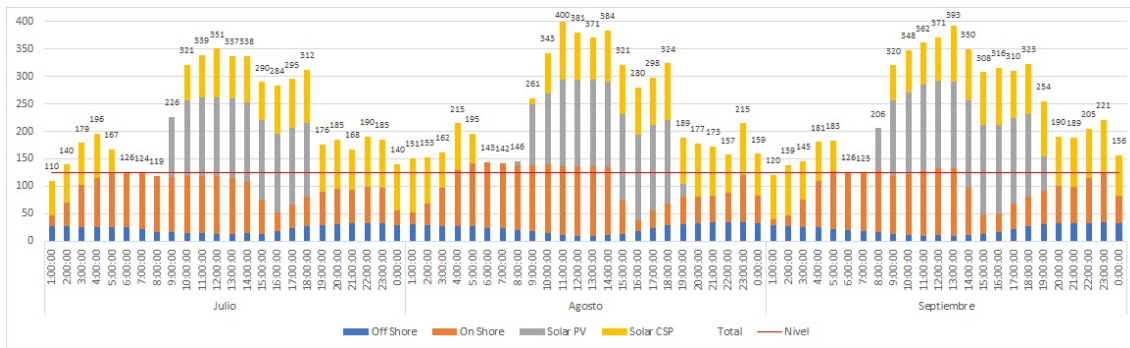
Figura 4.19: Distribución de Generación por Tecnología.



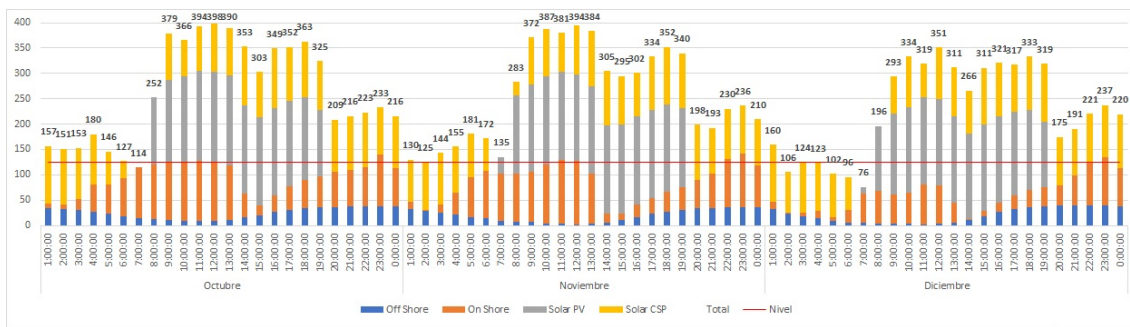
(a) Primer Trimestre



(b) Segundo Trimestre



(c) Tercer Trimestre



(d) Cuarto Trimestre

Figura 4.20: Distribución de Generación por Hora para un Día Tipo.

De las curvas de generación diaria se aprecia que la forma de la curva de generación es medianamente estable en el tiempo, teniendo una producción cercana a los 200 MWh durante el periodo entre las 1:00-5:00 am, posteriormente se aprecia un descenso marcado entre las 6:00-7:00 am debido a que es en este período en el cual la central solar CSP pierde su capacidad de generación con el sistema de almacenamiento y la entrada en acción de una central solar PV. Durante el período comprendido entre las 8:00 y 18:00 horas existe una generación muy cercana al 80 % de factor de planta y esto se debe principalmente a que las centrales solares se encuentran en su máxima capacidad de generación. Finalmente en el periodo comprendido entre las 19:00- 00:00 se mantiene un nivel estable de generación un poco superior al primer periodo del día debido a que la central eólica presenta una mayor capacidad de generación en ese horario.



## 4.6. Evaluación Social Costo-Beneficio

Como se explicó anteriormente no basta una evaluación económica para abarcar todo el impacto de un proyecto de generación que parte como solución a un problema que es principalmente social y ambiental.

### 4.6.1. Beneficio por Generación de Nuevos Empleos

El valor del empleo medio se puede apreciar en la tabla 4.24.

**Tabla 4.24:** Número de Empleos en Industria Energética Estadounidense

Tecnología	Cantidad de empleos	Costo Total	Empleo Medio
Solar	33000	\$ 300.000.000	\$ 9.091
Eólica	5600	\$ 31.000.000	\$ 5.536

Con estos valores y combinados con los datos de generación de empleos por tecnologías descritos en 4.30 se calcula el beneficio generado el cual se muestra en la tabla 4.25. Es importante destacar que han sido descontados los valores de los empleos generados por la central de generación térmica que se busca reemplazar.

**Tabla 4.25:** Beneficios Por Creación de Nuevos Empleos

Tecnología	Empleos Generados	Beneficio (USD)
Solar PV	1074	\$ 9.763.636
Solar CSP	805,5	\$ 7.322.727
Eólica Offshore	140,875	\$ 779.844
Eólica Onshore	563,5	\$ 3.119.375
Total		\$ 20.985.582

### 4.6.2. Van Social

Luego de aplicados los criterios para la evaluación social de los proyectos que se pueden encontrar en el texto Evaluación Social de Proyectos del Mideplan [57] y aplicando los factores de corrección indicados para la mano de obra se obtienen los indicadores que se pueden apreciar en la tabla 4.26. Los resultados económicos se revierten para todas las tecnologías, obteniéndose un VAN positivo

para todas las tecnologías exceptuando la central solar CSP. Por otra parte es destacable mencionar que en conjunto el resultado del proyecto completo también resulta positivo, resultando un van final de MMUS\$279.955.000. Lo cual se ve explicado por la consideración de una tasa de descuento un 4 % menor, además de considerar un valor positivo por la generación de empleos y por la capacitación del personal a trabajar en el proyecto. Es importante mencionar que existe un beneficio en la reducción de enfermedades potenciales por la contaminación que aún no está estimado para enfermedades generadas por contaminación de productos marítimos y que por lo tanto no se ha incluido en este análisis, pero si se encuentra en la evaluación multi-criterio.

**Tabla 4.26:** Resultados Evaluación Social Centrales

	Indicadores	Solar PV	Eólica Off Shore	Eólica	Solar CSP
	Inversión	\$ 420.000.000	\$ 170.430.000	\$ 312.110.000	\$ 1.193.859.000
Económicos	VAN	\$ 293.039.560	\$ 39.349.631	\$ 79.993.895	-\$ 132.387.420
	Tir	25,49 %	7,70 %	15,40 %	5,52 %

Fuente: Elaboración Propia

## 4.7. Evaluación Multi-criterio

A continuación se muestran los resultados obtenidos para los distintos criterios evaluados, es importante destacar que las notas son calculadas como promedio de las evaluaciones en los casos en que existe un análisis cualitativo, integrando además en los resultados los comentarios realizados por los expertos. Para los criterios cuantitativos la forma de evaluación fue definida en conjunto con el grupo de expertos.

### 4.7.1. Resultados Sociales

#### a) Riesgo No Cancerígeno (Cuantitativo):

Para el riesgo No Cancerígeno se evaluaron dos formas de riesgos, el primer riesgo considerado es el que ocurre por la ingesta de alimentos obteniéndose los resultados mostrados en la tabla 4.27.

Por otra parte se calculó el riesgo no cancerígeno por contacto dermal, los resultados se muestran en la tabla 4.28.

Observando los resultados anteriores queda demostrado lo afectada que se encuentra la población de la zona. Debido a que las centrales de generación por ERNC no contribuyen con emisiones de los metales pesados y cualquier disminución en las emisiones de estos contaminantes analizados se considera que la evaluación en este criterio es:

**Tabla 4.27:** Riesgo No Cancerígeno Medido Según el Rango Etario por Ingesta de Alimentos

Índice de Peligrosidad	V	Ni	Cu	Zn	Mo	Cd	Hg	As	Se
Lactantes	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Preescolares	0,93	0,86	112,43	0,17	0,33	0,66	1,65	6,61	0,07
Escolar	0,52	0,48	62,81	0,09	0,18	0,37	0,92	3,69	0,04
Adolescentes	0,44	0,26	17,86	0,01	0,10	2,18	0,50	1,98	0,02
Adultos	0,32	0,19	13,21	0,01	0,07	1,61	0,37	1,47	0,01
Adulto Mayor	0,34	0,20	13,80	0,01	0,08	1,69	0,38	1,53	0,02

Fuente: Elaboración Propia

**Tabla 4.28:** Riesgo No Cancerígeno Medido Según el Rango Etario para Contacto Dermal

Elemento	HQ
Cd	0,0015
Hg	0,0164
Ni	0,0013
Zn	0,0014
Mo	0,1073
Se	0,0002
As	0,2609

Fuente: Elaboración Propia

- Conjunto Centrales ERNC: 5
- Central Térmica: 1

### b) Riesgo Cancerígeno (Cuantitativo)

Para el riesgo cancerígeno solo se considera el arsénico como agente de riesgo y solo fue evaluado para el impacto por ingesta de alimentos debido a que el valor para la exposición dermal en este caso es despreciable. Los resultados se muestran en la tabla 4.29.

**Tabla 4.29:** Evaluación de Riesgo Cancerígeno por Ingesta de Alimentos para Concentración de Arsénico

Riesgo de Cáncer	1,17E-04
------------------	----------

Fuente: Elaboración Propia

Debido a que el resultado es muy alto con respecto al límite expuesto en la sección anterior y que el Conjunto Centrales ERNC analizadas no contribuyen con emisiones de arsénico se considera que su evaluación es:

- Conjunto Centrales ERNC: 5

- Central Térmica: 1

### c) Educación (Cualitativo)

Para el criterio de educación ambiental se obtuvieron comentarios sobre que la inclusión de ERNC a la generación local generaría incentivos a mejorar los niveles de conocimiento sobre las distintas posibilidades de generación, pero no solo basta con la construcción de centrales, sino que deben generarse programas de acercamiento y educación a la población cercana.

- Conjunto Centrales ERNC: 3,25
- Central Térmica: 1

### d) Investigación e Innovación (Cualitativo)

En cuanto a este criterio los comentarios recibidos fueron mayormente positivos para la combinación de centrales de ERNC esto debido al gran potencial eólico y solar de la zona es un gran lugar para desarrollar esta tecnología y realizar estudios técnicos con el fin de mejorar los productos utilizados en la construcción de las centrales. Además considerando la restricción de instalación de todos los tipos de centrales se obtienen los siguientes resultados:

- Conjunto Centrales ERNC: 4
- Central Térmica: 1

### e) Autoestima de la Comunidad (Cualitativo)

En cuanto a la autoestima de la comunidad se ha visto sobrepasada durante mucho tiempo por los proyectos energéticos que se encuentran en funcionamiento en la zona, por otra parte la integración de ERNC con un menor impacto en todos los aspectos. La percepción es que tendría una contribución.

- Conjunto Centrales ERNC: 4,25
- Central Térmica: 1

### f) Aceptabilidad de la Comunidad (Cualitativo)

Los comentarios recibidos apuntan a que cualquier método de generación con un menor impacto será recibido de buena forma por parte de la comunidad.

- Conjunto Centrales ERNC: 4,5
- Central Térmica: 1

### g) Creación de Empleos (Cuantitativo)

Para analizar la creación de Empleos se utilizarán los datos obtenidos de la generación de empleos por centrales de generación en EEUU para centrales de 500 MW, estos datos se muestran en la tabla 4.30.

**Tabla 4.30:** Creación de Empleos para Distintos Tipos de Centrales de Generación

Type of power plant	Job creation (new employees/500 MW)
Coal/lignite	2500
Oil	2500
Natural gas turbine	2460
Natural gas combined cycle	2460
Nuclear	2500
Hydro	2500
Wind	5635
Photovoltaic	5370
Biomass	36,055
Geothermal	27,050

Fuente: [79], [80], [81]

Para obtener una evaluación se utiliza una curva lineal considerando como valor mínimo el valor más bajo en la creación de empleos. Según estos datos las evaluaciones asignadas:

- Conjunto Centrales ERNC: 4.87
- Central Térmica: 2.27

## 4.7.2. Resultados Ambientales

### a) Emisión de Metales Pesados (Cualitativo)

Debido a que las centrales de generación por ERNC analizadas no contribuyen con emisiones de los metales pesados analizados se considera que su evaluación en este criterio es de 5, por otra parte la central térmica a carbón es evaluada con nota 1.

- Conjunto Centrales ERNC: 5
- Central Térmica: 1

### b) Emisiones de GEI (Cuantitativo)

Según los datos de la tabla 2.17 y aplicando una curva lineal de calificación se obtienen las siguientes evaluaciones por los tipo de centrales:

- Conjunto Centrales ERNC: 4.38
- Central Térmica: 1

### c) Residuos Sólidos y Líquidos (Cualitativo)

Debido a que las las centrales de generación por ERNC analizadas no contribuyen con emisiones de sólidos y líquidos se considera que su evaluación es de la siguiente forma:

- Conjunto Centrales ERNC: 5
- Central Térmica: 1

### d) Requerimiento de Tierras (Cuantitativo)

En cuanto al requerimiento de Tierras para una planta de 200 MW de generación fotovoltaica se requieren 500 hectáreas de terreno <sup>25</sup>, para una central de generación eólica se calculó un promedio de 3200 hectáreas <sup>26</sup> y para una central térmica a carbón equivalente a la central Angamos ubicada en la misma localidad solo se utilizaron 22 hectáreas de terreno <sup>27</sup>, debido a la gran diferencia en el requerimiento de tierras las calificaciones obtenidas son:

- Conjunto Centrales ERNC: 1
- Central Térmica: 5

### e) Impacto sobre la Flora y Fauna Local (Cualitativo)

Se menciona que si bien las centrales de ERNC tienen un menor impacto sobre la flora y fauna debido a una reducción en la contaminación se destaca que existen impacto en los distintos tipos de centrales para las aves en el caso de las tecnologías de concentración Solar y eólicas, además de un impacto a la flora y fauna marina por la instalación de la central eólica fuera de costa.

- Conjunto Centrales ERNC: 3
- Central Térmica: 1

## 4.7.3. Resultados Económicos

### a) Desarrollo Turístico (Cualitativo)

En cuanto al desarrollo turístico se recibieron comentarios acerca de que una central de ERNC puede contribuir al desarrollo, pero su impacto no marcará una gran diferencia con una central del tipo térmica.

<sup>25</sup>Datos Obtenidos de Software NREL-SAM

<sup>26</sup>Datos Obtenidos de Software NREL-SAM

<sup>27</sup>Informe SEIA

- Conjunto Centrales ERNC: 3
- Central Térmica: 3

### b) Tasas de Compensación (Cuantitativo)

Para el análisis de las tasas de compensación necesarias para cada tipo de central se evalúan en cuanto a nivel de inversión necesaria para compensar el impacto creado, estos datos se obtienen de [82] y se muestran en la tabla 4.31

**Tabla 4.31:** Tasa de Compensación para Distintos Tipos de Centrales de Generación

Type of power plant	Compensation rates (eurocents/kWh)
Coal/lignite	8.40
Oil	6.75
Natural gas turbine	2.00
Natural gas combined cycle	1.33
Nuclear	0.49
Hydro	0.56
Wind	0.16
Photovoltaic	0.24
Biomass	2.65
Geothermal	0.20

Fuente: [82]

Según estos datos y utilizando una curva lineal de evaluación la clasificación utilizada se obtienen evaluaciones de:

- Conjunto Centrales ERNC:1,85
- Central Térmica: 5

### c) Costos Energéticos (Cualitativo)

Para esta sección se analizó la necesidad de transportar el combustible a la zona de generación eléctrica, debido a esto la central térmica recibe una baja calificación, en cuanto a las centrales de ERNC no reciben calificación máxima debido a la necesidad de la importación de equipos.

- Conjunto Centrales ERNC: 3,77
- Central Térmica: 1

### d) Usos de Agua (Cualitativo)

Debido a que las centrales de generación por energía solar fotovoltaica y las centrales eólicas analizadas no requieren agua para su funcionamiento, pero si la central de concentración solar se considera que su evaluación es de la siguiente forma:

- Conjunto Centrales ERNC: 3
- Central Térmica: 1

### e) Aprovechamiento del Recurso Local (Cualitativo)

Este punto tiene una relevancia importante entre los encuestados de ambos grupos, debido a que actualmente Chile en general cuenta con un gran potencial de ERNC no explotado y que debe ser clave en cuanto a la descontaminación de las zonas saturadas.

- Conjunto Centrales ERNC: 5
- Central Térmica: 1

### f) Disponibilidad Energética (Cualitativo)

Según los datos obtenidos de la evaluación económica y observados en la tabla 4.22 se obtienen las siguientes evaluaciones:

- Conjunto Centrales ERNC: 3
- Central Térmica: 5

### g) Desarrollo Económico de la Zona (Cualitativo)

Según los encuestados el desarrollo económico de la zona se verá afectado de mayor manera por el desarrollo de una central térmica a una central de ERNC debido a que las emisiones de metales pesados afectan directamente el recurso pesquero de la zona.

- Conjunto Centrales ERNC: 3,33
- Central Térmica: 1

## 4.7.4. Resumen de Resultados

A partir de la opinión de expertos se obtuvieron las ponderaciones que para los subcriterios que se muestran en la tabla 4.32. Para la obtención de estas calificaciones se tomaron en cuenta condiciones particulares de la zona afectada, las cuales se detallan a continuación:

- Los problemas sociales generados en esta localidad tienen su causa en los criterios ambientales considerados en esta evaluación multi-criterio, es por esto que se debe asignar una importancia superior a estos últimos.
- Los criterios económicos analizados como el desarrollo de la economía local y desarrollo del turismo no es posible obtenerlos en zonas altamente contaminadas, es por esto que estos criterios obtuvieron una menor ponderación.

- El sub-criterio económico tasas de compensación no es un criterio que se utilice actualmente en la realidad de nuestro país, es por esto que este criterio obtiene una baja importancia por sobre los demás.
- El criterio ambiental Emisiones de GEI es un criterio que toma en cuenta las emisiones a nivel de afectación global, es por esto que se considera de menor importancia en comparación a criterios como Emisión de Metales que tienen un efecto local en una zona que se encuentra altamente contaminada.

Para esto se utiliza el software Expert Choice el cual está ideado con el fin de contribuir con las decisiones Multi-Criterio y evaluar la pérdida de consistencia al atribuir al obtener las ponderaciones para cada uno de los criterios incluidos en el modelo.

Luego del análisis Multi-criterio realizado se obtiene como resultado final que la combinación de centrales de ERNC presenta una mejor evaluación que la central térmica a carbón, siendo esta última totalmente inferior en todos sus resultados. Por lo tanto para la zona de Mejillones la solución más recomendable será esta combinación de centrales.

**Tabla 4.32:** Ponderaciones Locales y Globales para los Sub-Criterios

Criterios	Ponderación Local	Ponderación Global
<b>Impactos Sociales</b>	0,231	0,231
a) Riesgo No Cancerígeno	0,155	0,035805
a) Riesgo Cancerígeno	0,309	0,071379
b) Educación	0,096	0,022176
c) Investigación e Innovación	0,059	0,013629
d) Concientización Ambiental	0,083	0,019173
e) Autoestima de la Comunidad	0,112	0,025872
f) Aceptabilidad de la Comunidad	0,102	0,023562
g) Creación de Empleos	0,084	0,019404
<b>Impactos Ambientales</b>	0,692	0,692
a) Emisión de Metales Pesados	0,25	0,173
b) Emisiones GEI	0,125	0,0865
c) Residuos sólidos y líquidos	0,25	0,173
d) Requerimiento de Tierras	0,125	0,0865
e) Impacto sobre flora y fauna local	0,25	0,173
<b>Impactos Económicos</b>	0,077	0,077
a) Desarrollo Turístico	0,107	0,008239
b) Tasa de Compensación	0,062	0,004774
c) Costos Energéticos	0,095	0,007315
d) Usos de Agua	0,253	0,019481
e) Aprovechamiento Recurso Local	0,253	0,019481
f) Disponibilidad Energética	0,093	0,007161
g) Desarrollo Económico de la Zona	0,137	0,010549

**Tabla 4.33:** Calificaciones Finales

		Conjunto ERNC	Carbón
<b>Impactos Sociales</b>	a) Riesgo No Cancerígeno	0,42	0,08
	a) Riesgo Cancerígeno	0,51	0,10
	b) Educación	0,10	0,04
	c) Investigación e Innovación	0,14	0,06
	d) Concientización Ambiental	0,07	0,02
	e) Autoestima de la Comunidad	0,19	0,04
	f) Aceptabilidad de la Comunidad	0,51	0,10
	g) Creación de Empleos	0,10	0,05
<b>Impactos Ambientales</b>	a) Emisión de Metales Pesados	0,78	0,16
	b) Emisiones GEI	0,21	0,04
	c) Residuos sólidos y líquidos	0,62	0,16
	d) Requerimiento de Tierras	0,07	0,11
	e) Impacto sobre flora y fauna local	0,22	0,05
<b>Impactos Económicos</b>	a) Desarrollo Turístico	0,02	0,01
	b) Tasa de Compensación	0,01	0,04
	c) Costos Energéticos	0,03	0,10
	d) Usos de Agua	0,08	0,02
	e) Aprovechamiento Recurso Local	0,08	0,02
	f) Disponibilidad Energética	0,12	0,25
	g) Desarrollo Económico de la Zona	0,04	0,04
	Notas Finales	4,31	1,49

## 5 | Conclusiones generales.

Las zonas saturadas en nuestro país son una constante amenaza para la salud de las personas y el ambiente que las rodea, actualmente no existen planes de descontaminación eficientes, ni leyes que actúen de forma certera con el fin de prevenir o solucionar los problemas de contaminación. La falta de planificación a la hora de diseñar los parques industriales y la nula consideración sobre los impactos que pueden tener la acumulación de industrias en tan pequeños sectores geográficos trae consigo una serie de impactos que son imposibles de desconocer.

La creciente demanda de energía debido al alto crecimiento económico de nuestro país ha generado que existan zonas en las cuales se tienen hasta 2.2 MW de capacidad instalada en un lugar geográfico que no supera los 30 km de distancia entre las centrales de generación más alejadas. Durante los últimos 30 años ha existido una acción deliberada en cuanto a beneficiar a los grupos económicos más importantes en desmedro de la población, originando impactos reconocidos y altamente estudiados por la literatura científica tanto nacional como internacional.

Es por estos motivos que se deben tomar decisiones importantes en cuanto a los métodos de evaluación que se presentan a la hora de escoger los territorios y los tipos de centrales de generación que se ubicarán en estos, para responder a esta problemática es que éste estudio ha promovido una forma integral de evaluar la instalación de centrales que entreguen una base de generación sustentable y que basen su funcionamiento en ERNC con el fin de que por una vez no sólo sean considerados los intereses de unos pocos sobrepasando los derechos de muchas personas.

Se ha demostrado que existe una relación importante entre la presencia de centrales de generación térmica y la alta contaminación presente en diversas zonas geográficas en Chile, múltiples organizaciones han puesto estos temas en las instituciones que deberían velar por los intereses de todos los chilenos, pero ha quedado demostrado que el poder económico y la incapacidad de crear leyes que protejan a la población de situaciones altamente complejas para la salud han sido factores tremendamente superiores que el derecho a vivir en un ambiente libre.

Chile es uno de los países más ricos en cuanto a la disponibilidad de recursos naturales, su distribución geográfica nos ha brindado infinitas soluciones al problema de la alta dependencia de energía que presenta nuestro país que se arrastra desde la década de los 80's. Es imperativo que en

tiempos en los cuales existe una volatilidad extrema en los mercados de commodities y con una baja sostenida de los costos de las ERNC se tomen decisiones que marquen un precedente en cuanto desligarse definitivamente de la dependencia de combustibles que no poseemos y que son altamente tóxicos con el medio ambiente.

Según la literatura científica nacional el potencial solar, eólico e hídrico de nuestro país supera con creces las necesidades energéticas actuales, estos recursos deben ser aprovechados. Un buen paso hacia un país libre dependencia energética y contaminación sería la sustitución de las centrales térmicas a carbón de las zonas de sacrificio presentes en nuestro país por centrales de ERNC que según ha demostrado este estudio presentan un potencial de generación importante en al menos los 5 mayores ecosistemas más contaminados del país.

El trabajo realizado y la revisión literaria científica indican que es posible obtener un reemplazo eficiente de centrales térmicas que se encuentran en funcionamiento actualmente en zonas de alta contaminación mediante la combinación y el aprovechamiento de los múltiples recursos disponibles en las distintas zonas de nuestro país.

Luego de la evaluación económica realizada en la zona de Mejillones se puede afirmar que la inclusión de ERNC a la matriz energética nacional no solo corresponde a actos de buenas intenciones o a proyectos de baja rentabilidad, sino que por el contrario deberían ser considerados tanto por privados como por el gobierno, se debe crear la instrumentación legal con el fin de que los proyectos de generación que se encuentran aprobados en cuanto a su evaluación de impacto ambiental sean construidos y no se queden solo en el papel.

La evaluación Multi-Criterio permite evaluar una serie de factores que son difíciles de cuantificar económicamente o que la comunidad científica no ha llegado a consenso en cuanto a cual es el real impacto que poseen, estos criterios no deberían ser desechados, sino que deberían ser tomados en cuenta ya que para el estudio de cualquier proyecto se deberían evaluar todos los impactos ya sea se provoquen directa o indirectamente por el funcionamiento de un proyecto en particular. Por otra parte permite escoger entre dos proyectos que económicamente son similares basándose en decisiones que se encuentran fundamentadas bajo criterios matemáticos y que han sido altamente aceptados por la literatura científica.

A través de la utilización de todas las herramientas de análisis disponibles en este estudio se ha logrado establecer una diferencia sustancial en cuanto a la situación actual en la que se encuentra inmersa la zona de Mejillones y un nuevo estado con un menor impacto debido a la generación de energía para suplir las necesidades del gran número de industrias presentes en la zona.

Con este trabajo queda sentada una base que puede ser mejorada y replicada con el fin de evaluar el mismo problema en otras localidades con alta concentración de contaminantes por generación eléctrica en nuestro país.

# Bibliografía

- [1] Oceana. Resolución N° 315/2016. page , 2016.
- [2] Fundación Terram. Sacrificando Chile Por la Inversión. page , 2016.
- [3] Fiallega and Gomez. PRIMER DIAGNOSTICO NACIONAL DE SALUD AMBIENTAL Y OCUPACIONAL. *CARMEN ESTELA*, page , 2002.
- [4] De Pietri and Dietrich and Mayo and Carcagno,. Evaluación multicriterio de la exposición al riesgo ambiental mediante un sistema de información geográfica en argentina. *Rev. Panam. Salud Publica*, 30(4):377–387, 2011.
- [5] Pope, C. A and Dockery,D. Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 6(56):709–742, 2006.
- [6] ATSDR. Agency For Toxic Substances and Disease Registry. page , 2000.
- [7] Ministerio de Energía. Estrategia Nacional de Energía 2012 - 2030. pages 1–38, 2012.
- [8] Energía 2050 Ministerio de Energia. Energía 2050: Política Energética De Chile, 2015.
- [9] IEA. Projected Costs of Generating Electricity. page , 2015.
- [10] CNE. Resolución N° 315/2016. page , 2016.
- [11] English, J. No hay luz verde para el sol. page , 2013.
- [12] OEI. Transparent cost database. page , 2013.
- [13] Santana, C. EL POTENCIAL EÓLICO, SOLAR E HIDROELÉCTRICO DE ARICA A CHILOÉ. page , 2014.
- [14] Ministerio de Medio Ambiente. Informe Ambiental. page , 2012.
- [15] CONAMA. Informe final relación de la norma de calidad primaria MP2,5 con la norma de calidad primaria de MP10. page , 2010.
- [16] EPA. Integrated science assessment for particulate matter: Final report. page , 2009.
- [17] MMA. Análisis general de impacto económico y social del anteproyecto de revisión de la norma de emisines. page , 2011.
- [18] IPCC. fuentes de energía renovables y mitigación del cambio climático. page , 2011.
- [19] SMA. Guía de aspectos ambientales relevantes para centrales termoeléctricas. Enero:, 2014.
- [20] Kelly, FJ. Air Pollution, oxidative stress, and allergic response. page , 2004.

- [21] CONAMA. Análisis general del impacto económico y social de una norma de emisión para termoeléctricas. page , 2009.
- [22] Praveen, Amar. Mercury and Coal-Fired Power Plantas: Technology, and Emerging States and Federal Regulations. *NESCAUM MIT Endicott Hoyse Symposium on Air Toxics August 3-5*, page , 2004.
- [23] DICTUC. Análisis de la Calidad del Aire para MP-10 en Tocopilla. Estudio elaborado para CONAMA II. page , 2006.
- [24] Sanhueza. Análisis técnico del plan de descontaminación por MP10 para Tocopilla y de las observaciones al anteproyecto. Estudio elaborado para CONAMA II. page , 2008.
- [25] Universidad de Chile. ESTADO DEL MEDIO AMBIENTE EN CHILE 2012. Mayo:, 2012.
- [26] CREA, UA). Informe Resultados de Monitoreo. Mayo:, 2012.
- [27] S.P.A. PERFIL EPIDEMIOLOGICO DE MORBIMORTALIDAD DE LA COMUNA DE MEJILLONES. Mayo:, 2012.
- [28] Müller-steinhausen, H and Trieb, F. Concentrating solar power: a review of the technology. page , 2004.
- [29] GENI and Chu, Y. Review and Comparison of Different Solar Energy Technologies. page , 2011.
- [30] IEA. Technology Roadmap: Concentrating Solar Power. page , 2010.
- [31] CSP Alliance. The economic and reliability benefits of CSP with thermal energy storage. page , 2010.
- [32] Garcia, S. Guia Técnica de la Energía Solar Termoeléctrica . page , 2012.
- [33] Joga, H and Acosta, A. Diseño de una planta termosolar de receptor central con sales fundidas como fluido de trabajo y sistema de almacenamiento. page , 2012.
- [34] SolarPACES. Solar Power Tower. pages 6–26, 2008.
- [35] Pareja, I and Villa, J. Tecnologías de generación en plantas solares de receptor central: estudio comparativo. page , 2012.
- [36] Medrano, M and Gil, A and Martorell, I and Potau, X and Cabeza, L. State of the art on high-temperature thermal energy storage for power generation . Part 2 — Case studies.. (14):56–72, 2010.
- [37] SENER. Solar Tres. page , 2007.
- [38] NREL. Assessment of Parabolic Trough and Power Tower Solar Technology Cost and Performance Forecasts. page , 2003.
- [39] Villarrubia, M. Ingeniería de la energía eólica. page , 2012.
- [40] European Wind Energy. The european off shore wind industry key trends and statistics 2013. page , 2014.
- [41] CNE. Proyectos eólicos. page , 2006.

- [42] Kazmerski, L. Photovoltaics: A review of cell and module technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, (1):71–170, 1997.
- [43] RETScreen . . *International Clean Energy Project Analysis*, page , 2010.
- [44] EnerAgen. Energía solar térmica y fotovoltaica en el marco del Código Técnico de la Edificación. page , 2007.
- [45] IRENA. RENEWABLE POWER GENERATION COSTS IN 2014. page , 2015.
- [46] ECN (Energy Research Centre of the Netherlands). Properties of the O&M cost estimator, ECN, Petten. 29, 2011.
- [47] Arancibia, S and Contreras, E and Mella, S and Torres, P and Villablanca, I. Evaluación multicriterio: aplicación para la formulación de proyectos de infraestructura deportiva. page , 2003.
- [48] Pacheco, J and Contreras, E. Manual metodológico de evaluación multicriterio para programas y proyectos.. page , 2008.
- [49] Gaete, R. RECUPERACIÓN AMBIENTAL DE LA BAHÍA DE QUINTERO MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN PARQUE EÓLICO OFFSHORE. page , 2016.
- [50] Saaty, T. How to make a decision: the analytic hierarchy process. *European journal of operational research*. 48(1):9–26, 1990.
- [51] IRENA. RENEWABLE POWER GENERATION COSTS IN 2014. page , 2015.
- [52] CNE. INFORME COSTOS DE INVERSIÓN POR TECNOLOGÍA DE GENERACIÓN . page , 2015.
- [53] Allende, C and Carlos, M<sup>a</sup>. . Viabilidad técnico económica de un parque eólico marino. page , 2014.
- [54] CDEC-SING. Plan de Integración ERNC al SING. 2016.
- [55] Dirección de Inversiones y Finanzas Públicas. Libertad y Orden República de Colombia MANUAL DE VALORACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DE BENEFICIOS Bogotá . pages 0–47, 2006.
- [56] NREL. Dollars from Sense Benefits, The Economic and Energy, Renewable.
- [57] MIDEPLAN. Evaluación Social de Proyectos. Technical report. page , 2013.
- [58] Parodi, V. Propuesta metodológica para la evaluación integral de proyectos en el sector energético. PhD thesis. page , 2013.
- [59] Chatzimouratidis, A and Pilavachi, P. Multicriteria evaluation of power plants impact on the living standard using the analytic hierarchy process. *Energy Policy*. *Energy Policy*, (36(3)):1074–1089., 2013.
- [60] Cavallaro, F and Ciruolo, L . A multicriteria approach to evaluate wind energy plants on an italian island. *Energy Policy*, (33(2)):235–244, 2005.
- [61] EPA. Exposure Factors Handbook: Chapter 7, Dermal Exposure Factors. *EPA, Washington D.C, USA.*, page 77, 2011.

- [62] Ministerio del Medio Ambiente. Evaluación de riesgos para la salud de las personas y biota terrestre por la presencia de contaminantes, en el área de influencia industrial y energética de las comunas de Concón, Quintero y Puchuncaví. page , 2014.
- [63] Olivera, E . (Energía y medio ambiente. . *Revista Mexicana de Opinión Pública.*, page (9), 2010.
- [64] Soto, E and Leighton, G. (( Indicadores biológicos de ecosistemas marinos de fondos blandos y su importancia en los programas de monitoreo ambiental. *VI Jornadas del CONAPHI-CHILE, Viña del Mar, Chile.*, page , 1999.
- [65] H'Mida, S. (( Factors contributing in the formation of consumers' environmental consciousness and shaping green purchasing decisions. In *Computers and Industrial Engineering*, 2009. . *CIE 2009. International Conference on*, page (pp. 957–962), 2009.
- [66] Correa Pérez, J. (( Ventanas industrial complex: Exclusion of citizenship and governance problems: The case of 'campiche' between the legality and legitimacy. . *Revista Justicia Ambiental*, (4): (121–136), 2012.
- [67] Wang, Jiang-Jiang and Jing, You-Yin and Zhang, Chun-Fa; and Zhao, Jun-Hong . (( (2009). Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making. . *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 9(13): 2263–2278., 2009.
- [68] Chatzimouratidis, A and Pilavachi, Petros A . Multicriteria evaluation of power plants impact on the living standard using the analytic hierarchy process. . *Energy Policy*, 3(36): 1074–1089, 2008.
- [69] Moreno, José Manuel and Rosa, Diego de la and Zazo, Caridad. Evaluación preliminar de los impactos en España por efecto del cambio climático. España. Ministerio de Medio Ambiente. page , 2005.
- [70] Antizar-Ladislao, B. Environmental levels, toxicity and human exposure to tributyltin (TBT)-contaminated marine environment. *A review. Environ. Inter*, 3(34):292–308, 2008.
- [71] Conde-Álvarez, Cecilia and Saldaña-Zorrilla, Sergio, . Cambio climático en américa latina y el caribe: impactos, vulnerabilidad y adaptación. . *Ambiente y desarrollo*, 2(23):23–30, 2007.
- [72] Ahmed, El Nemr and Ghada F, El-Said and Safaa, Ragab and Azza, Khaled and Amany, El-Sikaily. The distribution, contamination and risk assessment of heavy metals in sediment and shellfish from the Red Sea coast, Egypt. *A review. Environ. Inter*, (165):369–380, 2016.
- [73] Hyun, S. and Lee, T. and Lee, C.H. and Park, Y.H. The effects of metal distribution and anthropogenic effluents on the benthic environment of gwangyang Bay, Korea. *Mar. Pollut. Bull.*, 1(52):113–120, 2006.
- [74] Inskip, Edward . Tourism planning: an emerging specialization. *Journal of the American Planning Association*, 3(54):360–372, 1988.
- [75] Pilavachi, Petros A and Stephanidis, Stilianos D and Pappas, Vasilios A and Afgan, Naim H . (2009). Multi-criteria evaluation of hydrogen and natural gas fuelled power plant technologies. *Applied Thermal Engineering*, 11(29): 2228–2234, 2009.
- [76] Macknick, J and Newmark, R and Heath, G; and Hallett, KC . Operational water consumption and withdrawal factors for electricity generating technologies: a review of existing literature. . *Environmental Research Letters*, 4(7): 045802, 2012.

- [77] Menegaki, Angeliki . Valuation for renewable energy: a comparative review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 9(12): 2422-2437, 2008.
- [78] Andrés, Pica and Enzo, Sauma. Los desafíos de la utilización de energías renovables no convencionales intermitentes. page , 2015.
- [79] Simons, G and Peterson, T. California renewable technology market and benefits assessment. . *Palo Alto, CA and Sacramento, CA: Electric Power Research Institute (EPRI) and California Energy Commission (CEC).*, page , 2001.
- [80] Singh, Virinder and Fehrs, Jeffrey E . The work that goes into renewable energy. *Renewable Energy Policy Project*, page , 2001.
- [81] (USDOE) . Clean power for 21st century dollars from sense: the economic benefits of renewable energy. Technical report. *Renewable Energy Policy Project*, page , 1997.
- [82] Ne, A y Oec, D . Nuclear electricity generation: What are the external costs? page , 2003.