



Diseño de un modelo probabilístico para apoyar el estudio de incertidumbre y riesgo asociado a la ejecución del proyecto de Geotermia en Nereidas como ERNC en la región para CHEC S.A.

E.S.P. BIC.

Camilo Andrés Duque Moreno

Universidad Nacional de Colombia

Ingeniería y Arquitectura, Departamento de Ingeniería Eléctrica

Manizales, Colombia

2023

Diseño de un modelo probabilístico para apoyar el estudio de incertidumbre y riesgo asociado a la ejecución del proyecto de Geotermia en Nereidas como ERNC en la región para CHEC S.A. E.S.P. BIC.

Diseño de un modelo probabilístico para apoyar el estudio de incertidumbre y riesgo asociado a la ejecución del proyecto de Geotermia en Nereidas como ERNC en la región para CHEC S.A.

E.S.P. BIC.

Design of a probabilistic model to support the study of uncertainty and risk associated with the execution of the Geothermal project in Nereidas as NCRE (Non-Conventional Renewable Energies) for CHEC S.A. E.S.P. BIC.

Camilo Andrés Duque Moreno

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ingeniería Eléctrica

Director (a): Título Ph.D., Sandra Ximena Carvajal

Codirector (a): Título Ph.D., Dahiana Lopez García

Línea de Profundización

Grupo de Investigación: E3P

Universidad Nacional de Colombia

Ingeniería y Arquitectura, Departamento de Ingeniería Eléctrica

Manizales, Colombia

2023

Declaración de obra original

Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.

Nombre

Fecha DD/MM/AAAA

Resumen

Este estudio presenta un modelo probabilístico para apoyar el estudio de incertidumbre y riesgo asociado a la ejecución del proyecto de Geotermia en Nereidas como ERNC en la región para CHEC S.A. E.S.P. BIC., mediante la aplicación de un caso de estudio ubicado en el departamento de Caldas (Colombia). El análisis es realizado teniendo en cuenta el desarrollo energético de Colombia, cuya matriz de generación eléctrica es predominantemente hídrica y la vulnerabilidad climática del país tiene una atribución directa en la generación de energía y el abastecimiento de la demanda requerida.

En primera instancia, se realizó una identificación de los proyectos geotérmicos a nivel nacional e internacional, considerando las limitadas fuentes de información existentes en el país con respecto a la generación de energía a partir de este tipo de tecnología. La revisión de la bibliografía fue realizada con el fin de identificar las variables de modelación más comunes e influyentes para la planeación, riesgos, construcción y puesta en operación de proyectos de esta índole, así como consideraciones técnicas y geológicas, inherentes. De esta manera, se definieron los esquemas de modelación de las variables, al igual que los factores y controles de riesgo y mayores incertidumbres establecidos en los proyectos analizados.

A continuación, en los siguientes capítulos, se dan a conocer los datos del caso de estudio, en los cuales se establecen las variables determinísticas para el desarrollo del proyecto en control de riesgos, las variables de modelación técnicas, financieras, legales, ambientales y sociales; y posteriormente las distribuciones probabilísticas asociadas. Las determinaciones de este proyecto fueron realizadas considerando la flexibilidad característica de los proyectos de energía, en especial de aquellos de carácter renovable, con el fin de obtener resultados que permitan tener una visión más cercana a la realidad de los proyectos, la incertidumbre de sus variables y los diferentes

escenarios de acción para la toma de decisiones por parte de sus involucrados. Esta tesis, entonces, utiliza la simulación Montecarlo para considerar diferentes escenarios de valoración como modelo de probabilidad e instaurar medidas de riesgo para abordar cuidadosamente las incertidumbres de este tipo de proyectos.

Palabras clave: Energía Geotérmica, Incertidumbre en proyectos, control de riesgos, transición energética, energías renovables no convencionales ERNC, Simulación de Montecarlo.

Abstract

This study presents a probabilistic model to support the study of uncertainty and risk associated with the execution of the Geothermal project in the region of Nereidas as NCRE for CHEC S.A. E.S.P. BIC., through the application of a case study located in the department of Caldas (Colombia). The analysis is carried out taking into account the energy development of Colombia, whose electricity generation matrix is predominantly hydrological, and the country's climatic vulnerability has a direct attribution in the generation of energy and the supply of the required demand.

In the first instance, an identification of geothermal projects at the national and international level was carried out, considering the limited sources of information existing in the country regarding the generation of energy from this type of technology. The literature review was carried out in order to identify the most common and influential modelling variables for the planning, risks, construction and start-up of projects of this nature, as well as inherent technical and geological considerations. This way, the definition of the modelling schemes, as well as the risk factors, controls and greater uncertainties were established for the analysed projects.

In the following chapters, the data of the case study are shown, in which the variables for the development of this project in the areas of risk control, technical, financial, legal, environmental and social modelling are established, and subsequently the associated probabilistic distributions. The determinations of this project were made considering the characteristic flexibility of energy projects, especially those of a renewable nature, in order to obtain results that allow us to have a closer view of the reality of the projects, the uncertainty of their variables. and the different action scenarios for decision-making by those involved. This thesis uses the Monte

Carlo simulation to consider different valuation scenarios, as a probability model and establish risk measures to carefully address the uncertainties of this type of project.

Keywords:

Geothermal Energy, Uncertainty in projects, risk control, energy transition, non-conventional renewable energies NCRE, Monte Carlo Simulation.

Tabla de Contenido

	Pág.
1 Introducción	13
1.1 Objetivos	18
1.1.1 Objetivo general	18
1.1.2 Objetivos específicos	18
2 Antecedentes y Diagnósticos Conceptuales.....	20
2.1 Definiciones Clave sobre Geotermia.....	20
2.1.1 Conceptos de Geotermia.....	21
2.1.2 Sistemas de generación de Aprovechamiento Energético.....	22
2.1.2.1 Plantas de vapor seco	22
2.1.2.2 Plantas de vapor flash.....	23
2.1.2.3 Plantas de ciclo binario	24
2.1.3 La Geotermia en Colombia.....	26
2.2 Antecedentes Internacionales.....	29
2.2.1 Países Líderes en Geotermia.....	29
2.2.2 Estudios sobre Geotermia.....	31
2.2.3 Experiencias Internacionales	33
2.3 Marco Regulatorio Colombiano.....	35
2.4 Empresa y Proyecto Valle de Nereidas	40
2.5 Incertidumbre, Métodos de Análisis de Incertidumbre, Riesgo y Proyectos Energéticos 43	
2.5.1 Incertidumbre y riesgo.....	44
2.5.2 Método de Análisis de Incertidumbre (De Sensibilidad)	49
2.5.3 Método de Análisis de Incertidumbre (Estimación de Intervalos de Confianza del Coste-Efectividad Incremental).....	50
2.5.4 Método de Análisis de Incertidumbre (Caja de Confianza)	50
2.5.5 Método de Análisis de Incertidumbre (Fieller)	51
2.5.6 Método Montecarlo	51
2.5.7 Control del Riesgo	53
3 Bases Determinísticas Proyecto Geotérmico Valle Nereidas	57

3.1	Variables para la factibilidad del Proyecto Nereidas	57
3.1.1	Variables preliminares proyecto Geotérmico	57
3.1.2	Variables técnicas	59
3.1.3	Variables económicas/financieros:	65
3.1.4	Variables políticas/jurídicas:	72
3.1.5	Variables ambientales.....	75
3.1.6	Variables socio/culturales:.....	80
3.1.7	Aplicación de Las Variables Determinísticas al Proyecto Nereidas	86
3.2	Matriz de Riesgos Proyecto Nereidas	90
3.2.1	Guía Metodológica para la Gestión Integral de Riesgos CHEC, versión 4 (2021), que aplica para CHEC S.A. E.S.P. BIC y para las empresas del Grupo EPM.....	90
3.2.1.1	Evaluar Controles Riesgos	95
3.2.1.2	Evaluación de controles	95
3.2.2	Matriz de riesgos	105
3.2.3	Nivel de riesgos	106
4	Modelo probabilístico proyecto Geotermia Valle Nereidas	111
4.1	Análisis Probabilístico Matriz De Riesgos.....	112
4.2	Análisis Probabilístico de Variables Determinísticas del Proyecto Nereidas.	119
4.3	Análisis probabilístico proyecto Nereidas.....	132
5	Conclusiones y trabajos futuros.....	134
6	Referencias.....	144

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 <i>Planta de generación de vapor seco o directo.</i> . Nota. Imagen tomada de: Termoquímica I (2011). Elisa Carrión, Juan Palou	23
Figura 2. <i>Planta de generación de Vapor Flash.</i> . Nota. Tomado de https://www.tlv.com/global/LA/steam-theory/flash-steam.html	24
Figura 3. <i>Planta de Generación de Ciclo Binario.</i> Nota. Tomado de https://www.tlv.com/global/LA/steam-theory/flash-steam.html	25
Figura 4. Tipo de planta más utilizada en el mundo. Nota. Datos obtenidos en valoración del tipo de planta más utilizado, información recolectada por el investigador. Adaptación de Bertani 2010	26
Figura 5. Ranking de <i>Top 10 Geothermal Countries 2022.</i> Fuente (basado en Think Geoenergy).	31
Figura 7. <i>Ubicación Geográfica Proyecto Nereidas.</i> Nota. Información obtenida por medio de la revisión de informes creado por el investigador.	43
Figura 7. <i>Estructura de la Norma ISO 31000.</i> Nota. Tomado de Fuente (NTC, 2009)	54
Figura 8. <i>Proceso Gestión de Riesgos.</i> Fuente: Nota. Tomado de Fuente (NTC, 2009).....	55
Figura 9. <i>Promedio de MW por pozo.</i> .Nota. Informado tomado de Stefansson, 2002.....	70
Figura 10. <i>Diagrama de flujo y Equipos CAPEX proceso geotérmico.</i> .Nota. Información tomada de la fuente (Carmona et. al, 2010).....	71
Figura 11. <i>Etapas de la gestión integral de riesgos.</i> .Nota. Guía Metodológica para la Gestión de Riesgos CHEC versión 4 (2021). Adaptado de ISO 31000:2018. Gestión del riesgo directrices. Ginebra Suiza.....	91
Figura 12. <i>Modelo simple con simulación de Montecarlo.</i> .Nota. Elaborado por el investigador.	112
Figura 13. <i>Costo Total de Materialización de Riesgos.</i> Nota. Elaborado por el investigador con Software @risk.	117
Figura 14. <i>Riesgos de Exploración varianza.</i> Nota. Elaborado por el investigador con Software @risk.....	118
Figura 15. <i>Ejemplo distribución de probabilidad subfactores.</i> .Nota. Elaborado por el investigador con Software @risk.....	120
Figura 16. <i>Distribución de probabilidad variables.</i> Nota. Elaborado por el investigador.	123
Figura 17 <i>Total de Subfactores - varianza.</i> Nota. Elaborado por el investigador con Software @risk.....	124
Figura 18. <i>Resultados probabilísticos variable política / legal.</i> Nota. Elaborado por el investigador con Software @risk.....	125
Figura 19. <i>Resultados probabilísticos variable ambiental.</i> Nota. Elaborado por el investigador con Software @risk.....	126

Figura 20. <i>Resultados probabilísticos variable socio /cultural.</i> Nota. Elaborado por el investigador con Software @risk.....	127
Figura 21. <i>Resultados probabilísticos variable económico/financiero.</i> Nota. Elaborado por el investigador con Software @risk.....	127
Figura 22. <i>Ejemplo distribución de probabilidad conceptos técnicos de CAPEX.</i> Nota. Elaborado por el investigador con Software @risk.....	130
Figura 23. <i>Distribución de probabilidad costo CAPEX del Proyecto.</i> Nota. Elaborado por el investigador con Software @risk.	130
Figura 24. <i>Varianza conceptos del CAPEX técnico .</i> Nota. Elaborado por el investigador con Software @risk.	131
Figura 25. <i>CAPEX del Proyecto Materialización de Riesgo.</i> Nota. Elaborado por el investigador con Software @risk.....	132

Lista De Tablas

	Pág.
Tabla 1 <i>Proyectos de Geotermia en Colombia</i>	29
Tabla 2. <i>Marco Normativo</i>	36
Tabla 3 <i>Antecedentes del Proyecto Geotérmico. Nota. Información obtenida por medio de la revisión de informes creado por el investigador</i>	41
Tabla 4. <i>Variables recomendadas literatura</i>	57
Tabla 5. <i>Subfactores de la variable técnica</i>	61
Tabla 6. <i>Características. Propiedades del campo y el recurso geotérmico Valle Nereidas.</i>	64
Tabla 7 <i>Subfactores variable económica / financiera</i>	68
Tabla 8. <i>Capex estándar proyectos Geotérmicos</i>	68
Tabla 9 . <i>Subfactores variables Políticas / legal</i>	73
Tabla 10. <i>Subfactores variable Ambiental</i>	77
Tabla 11. <i>Subfactores variable social</i>	82
Tabla 12. <i>Resultado Determinístico de las variables del proyecto Valle de Nereidas</i>	86
Tabla 13. <i>Escenarios de riesgo proyecto geotermia</i>	93
Tabla 14. <i>Promedio de Controles matriz de riesgos</i>	96
Tabla 15. <i>Evaluación del Control matriz de riesgos</i>	96
Tabla 16. <i>Criterios de Nivel de los Controles de la matriz de riesgos</i>	101
Tabla 17 <i>Matriz de riesgos</i>	105
Tabla 18. <i>Cantidad de Riesgos por criticidad</i>	105
Tabla 19. <i>Índice de Riesgo</i>	105
Tabla 20. <i>Nivel de riesgo a partir de la probabilidad y la consecuencia</i>	107
Tabla 21 <i>Distribución de Probabilidad de Ocurrencia</i>	113
Tabla 22 <i>Parámetros Sugeridos de Impacto</i>	113
Tabla 23 <i>Muestra Aleatoria de Escenarios de Riesgo con Probabilidad</i>	114
Tabla 24 <i>Ejemplo muestra aleatoria de variables y subfactores</i>	121
Tabla 25. <i>Escenario CAPEX técnico proyecto geotérmico - simulación</i>	129

1 Introducción

La búsqueda de energías renovables a nivel mundial ha ganado aceptación, transformando los modelos convencionales de producción energética. Esta investigación tiene como objetivo presentar un sistema productivo de energía basado en la geotermia, liderado por la empresa eléctrica de Caldas (CHEC S.A. E.S.P. BIC), con la perspectiva de establecer un modelo basado en la incertidumbre que brinde pautas para la toma de decisiones en el proyecto de Geotermia Valle Nereidas.

En Colombia, la creciente necesidad de obtener energía eléctrica limpia y económica, alejada de las fuentes convencionales (petróleo, carbón, gas natural), ha impulsado la presentación de proyectos a pequeña escala de generación de energía de fuentes no convencionales (FNCE) y proyectos menores a 20 MW. Según cifras de la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME) de marzo de 2021, estos proyectos aportan alrededor de 4.287 MW al sistema.

De estos proyectos, 104 pertenecen a energía solar fotovoltaica con una contribución de 1.931 MW, y 106 son de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCH) con una aportación de 1.190,25 MW. Se espera que estos proyectos, programados para 2023-2024, se lleven a cabo en 16 departamentos, siendo la Región Caribe la principal receptora de estas inversiones, concentrando la mayor parte de la nueva capacidad instalada (2.357 MW de los 3.330 MW programados). De los 80 proyectos previstos para 2023-2024, 78 son de energía solar (85% de la nueva capacidad de generación) y 2 son de energía eólica (15% de la capacidad).

En este contexto, surge los siguientes interrogantes: (i) ¿Por qué estos proyectos no se están implantando a mayor escala o con mayor capacidad (potencia)? y (ii) ¿Por qué una vez aprobados los proyectos por la UPME, los tiempos de ejecución no son eficientes?

Según información suministrada, “en el 2005 existían aproximadamente 145 sistemas fotovoltaicos [en Colombia], cuya capacidad instalada era de 208,06 kW, para 2014 en la matriz total energética de Colombia y por cualquier tipo de fuente de energía se tenía alrededor de 11,6 GW y en el 2015 esa capacidad total de Colombia se incrementó un 0,6 GW para un total aproximado de 12GW”. (Herrera et al., 2021). Sin embargo, a 2022, la capacidad instalada de energía solar y eólica representa tan solo alrededor del 1,5% de la matriz de capacidad eléctrica, con esto se ratifica que la generación de electricidad en el país a partir de fuentes renovables como la solar fotovoltaica es aún poco considerable, la capacidad efectiva neta de generación en toda la matriz del país, para el año 2023 es de 18.777 MW (enero 2023), de los cuales 66,8% corresponden a energía hidráulica, el 30,5% a energía térmica (Corficolombiana, 2023).

Por parte de MinMinas, en 2018, la fuente con mayor participación fue la hidráulica a gran escala, con 80,35%, mientras que las pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH) representaron 5,66%, la biomasa 0,95%, la solar 0,01% y la eólica 0,005% (Cinguenza, 2018), reflejando en FRNC un porcentaje bajo. Para marzo 2021, la fuente con mayor participación fue la hidráulica, con 84,9%, la solar 0,2% (CONCENTRA, 2021). Lo cual indica que en el trienio no se ha avanzado significativamente en el incremento de la participación de FRNC.

Esto presume que, a pesar de los incentivos de ley o fiscales entre los cuales se encuentran:

- (i) El Artículo 1 de la Ley 1715 del 2014, la cual *“tiene como objeto, promover la utilización y desarrollo de fuentes no convencionales de energía, principalmente aquellas de carácter renovable”*.
- (ii) El literal e. del artículo 2 de la misma ley que promulga *“Estimular la inversión, la investigación y el desarrollo para la producción y utilización de energía a partir de fuentes no convencionales de energía”* y

- (iii) La reducción de costos a nivel fabricación en los componentes equipos y materiales que constituyen las instalaciones fotovoltaicas, a nivel nacional,

Pese a que, aún no se destinan grandes recursos hacia proyectos de esta índole, debido a la incertidumbre de cada uno de los ejes tácticos para la ejecución de este tipo de proyectos ante la incapacidad de determinar con certeza algunos parámetros técnicos, económicos, sociales, ambientales y legales; situaciones que inviabilizan la materialización de los proyectos, en otras palabras, la incertidumbre con proyectos que requieren grandes inversiones de capital al inicio de su concepción, generan un balance costo - beneficio negativo.

En términos de planeación y perspectivas se publicó por parte del Consejo Nacional de Política Económica y Social (CONPES) 4075: denominado “Política de transición energética” resaltó que: *“En el país se destacan importantes avances en materia de transición energética, como (i) las subastas que adjudicaron contratos de largo plazo para la integración de proyectos de generación con energías renovables que permitirán contar a 2023 con una matriz eléctrica diversificada; (ii) el desarrollo de un marco regulatorio y fiscal atractivo para el impulso de nuevos proyectos de generación de energía; (iii) la inclusión de nuevos energéticos y tecnologías en la matriz de generación, y (iv) la formulación y aplicación de lineamientos para fortalecer las instituciones asociadas al sector minero energético”* (CONPES 4075, pág. 3).

Dicho lo anterior, se confirma que, aunque ha habido avances en el proceso de transición energética en Colombia, estos solo han sido parciales debido a la falta de coordinación entre los sectores clave del desarrollo energético del país, y porque dichos avances han tenido un enfoque a corto y mediano plazo.

Ahora bien, en cuanto a las energías renovables por proceso geotérmicos, en el documento se señala que el desarrollo y uso del potencial geotérmico es potencial y para 2022 publicó la

Diseño de un modelo probabilístico para apoyar el estudio de incertidumbre y riesgo asociado a la ejecución del proyecto de Geotermia en Nereidas como ERNC en la región para CHEC S.A. E.S.P. BIC

Resolución 40302 de 2022, por la cual se establecen los requisitos técnicos que regirán el registro geotérmico y los permisos de exploración y explotación del recurso geotérmico con fines de generación eléctrica.

El proyecto de geotermia Valle de Nereidas se presenta como una alternativa renovable, eficiente y respetuosa con el medio ambiente para la producción de energía eléctrica en Colombia. Este enfoque ofrece un gran potencial de desarrollo en el país, con la ventaja de no depender de condiciones atmosféricas o disponibilidad hídrica, proporcionando un recurso controlable y despachable que asegura energía constante.

La implementación de proyectos de energía geotérmica como el de Valle de Nereidas caso de uso de este documento, no solo impulsará el crecimiento y la creación de valor en el ámbito energético para todos los grupos interesados, sino que también representa una oportunidad significativa para compartir conocimientos con toda la región latinoamericana. La diversificación de la matriz energética mediante el aprovechamiento más limpio y eficiente de los recursos naturales disponibles permitirá a Colombia maximizar su potencial y crear un valor agregado sostenible en este ámbito.

Sin embargo, para lograr esto, es crucial considerar factores esenciales, entre ellos, la inversión económica, que abarca precios de CAPEX, OPEX, impuestos de los nuevos sistemas, rentabilidad, contratación, entre otros. Como propone Vivallo (2017), es necesario tener en cuenta estudios integrales de mercado, técnicos, aspectos ambientales, restricciones legales y proyecciones económico-financieras para viabilizar proyectos de manera integral.

Estos estudios estadísticos realizados en el documento sobre las implicaciones técnicas y económicas de la implementación de sistemas geotérmicos como el de Valle de Nereidas de CHEC

S.A. E.S.P., resulta crucial para evaluar la viabilidad de este proyecto y determinar su favorable implementación en términos de inversión.

El gobierno colombiano ha establecido incentivos fiscales para las energías renovables, lo que ha hecho que posiblemente sean económicamente viables (Ricaurte & Pérez, 2015) . Además, con la aprobación del CONPES 4075 en marzo de 2022 y la Resolución 40302 de 2022, la política de transición energética del país busca otorgar mayores incentivos a los promotores de proyectos de inversión en energías renovables no convencionales (ERNC), especialmente en proyectos geotérmicos, que aún no se han desarrollado en Colombia. Sin embargo, aunque el proyecto es innovador, rentable, histórico, necesario, factible y viable, tanto el Grupo EPM como la CHEC S.A. E.S.P. han evaluado que presenta riesgos para su ejecución debido a la volatilidad que podría surgir en sus diferentes etapas de construcción y a la percepción de riesgo empresarial, situación que validó la ejecución de esta investigación, como modelo para la toma de decisiones en ambientes de incertidumbre, analizando las etapas de construcción del proyecto geotérmico desde cada una de sus variables y las desviaciones de las mismas, así como los escenarios de riesgos y su impacto, utilizando modelos de Montecarlo que incluyen elementos de incertidumbre o aleatoriedad en su predicción.

El análisis y la gestión de riesgos en proyectos de energía eléctrica y aún más en la generación geotérmica del Valle de Nereidas, se destacan por la integración de conceptos clave relacionados con la gestión de proyectos, modelos estadísticos y una comprensión profunda de la incertidumbre inherente a este tipo de iniciativas. Este documento examina la importancia de reconocer que la estadística desempeña un papel trascendental tanto en la fase de investigación como en la ejecución de proyectos eléctricos, del proyecto en prefactibilidad de CHEC S.A. E.SP.

La selección apropiada de técnicas de análisis estadístico garantiza la seguridad y la veracidad de la investigación, también aporta una base sólida para la planificación de este proyecto. Este enfoque proporciona a los promotores de inversión un marco estructural que prioriza las principales variables y las desviaciones que pueden surgir durante la ejecución del proyecto. Este análisis detallado capacita a los responsables del proyecto para anticipar y controlar eficazmente las posibles variaciones, contribuyendo así a su correcta ejecución y puesta en servicio.

En resumen, la intersección entre la gestión de riesgos, modelos estadísticos y comprensión de la gestión del proyecto geotérmico Valle de Nereidas bajo incertidumbre, es esencial para establecer un enfoque sólido que garantice el éxito y la eficiencia en la implementación del proyecto de generación.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo general

Diseñar un modelo probabilístico que involucre los componentes de factibilidad técnica, procedimental y financiera desde ingeniería conceptual para apoyar el estudio de incertidumbre y riesgo asociado que inciden en la ejecución del proyecto de Geotermia Valle Nereidas de ERNC de la CHEC S.A. E.S.P.

1.1.2 Objetivos específicos

- Revisar los antecedentes de modelos, proyectos o ejecuciones de Proyectos de geotermia, que brinden elementos cuantitativos de riesgos e incertidumbre para el proyecto de Geotermia en CHEC S.A. E.S.P. para cada una de las variables establecidas.
- Establecer e incorporar en el modelo probabilístico los componentes para determinar la factibilidad de un proyecto de geotermia de energías renovables no convencionales.

- Identificar alternativas y estrategias con base en probabilística, que se traducirán en recomendaciones que serán útiles para cada etapa del proyecto, con el fin de minimizar el riesgo en su construcción.

2 Antecedentes y Diagnósticos Conceptuales

Este capítulo se centra en la recopilación sistemática de información relacionada con la geotermia, la industria y la energía renovable. Su objetivo es proporcionar al lector una comprensión técnica y conceptual del fenómeno de estudio, en particular, de la geotermia y su aplicación a escala industrial. Además, se busca caracterizar el panorama actual en relación con las oportunidades para una industria que aproveche la fuente de geotermia, en línea con los objetivos de la empresa CHEC S.A. E.S.P. BIC.

La revisión de la literatura abarca aspectos clave del proyecto en desarrollo y brinda un contexto literario sobre temas como geotermia, regulación de energía, riesgos, estadísticas, incertidumbre, entre otros. Esta fase inicial del estudio busca sentar las bases teóricas necesarias para el desarrollo del proyecto y el modelo que se pretende construir.

En particular, se destacan aspectos teóricos relacionados con la probabilidad y la incertidumbre, destacando su papel esencial en el ejercicio de inversión y puesta en marcha de procesos industriales vinculados a una fuente de energía aún poco explorada en Colombia. Se enfatiza en el acercamiento técnico como una herramienta para reducir riesgos y detectar necesidades en este contexto específico.

2.1 Definiciones Clave sobre Geotermia

Dentro de un ejercicio riguroso de indagación y presentación de conocimientos, es menester generar las bases para el conocimiento, por lo que, el acercamiento conceptual de un fenómeno facilita el reconocimiento del compuesto técnico y contextual al que hace referencia, con este proceso se permite ampliar las ideas conjuntamente y diseñar exploraciones evocadas hacia nuevo conocimiento.

2.1.1 Conceptos de Geotermia

En el caso de estudio, resulta imperante la definición de la geotermia que conforme el Servicio Geológico Colombiano (2019) definen la geotermia como “el calor natural existente al interior de la tierra” (p.3), en el caso ambiental, la consideración de la geotermia como un recurso renovable recae en su bajo impacto en el ambiente, en contraste a fuentes energéticas convencionales, puesto que, la menor reducción de gases de efecto invernadero y sólidos suspendidos en el aire, demuestra una baja ocupación de tierras para su desarrollo. Por otra parte, la geotermia no es dependiente del clima lo que supone una oportunidad para el consumo continuo del bien sin alteraciones externas, sin embargo, su aprovechamiento es local.

Bajo esta arista, Colombia cuenta con un potencial de manejo y aprovechamiento del recurso, no obstante, la ejecución de proyectos e iniciativas a escala industrial se encuentra limitada y en proceso de investigación, lo anterior, responde a la poca inversión tecnológica a la exploración de esta fuente energética. Por otra parte, un sistema geotérmico es el conjunto de roca caliente que puede hallarse a una profundidad entre 4 km y 5 km de la superficie de la tierra, la cual acumula energía que puede ser aprovechada para diversos fines con el apoyo de la tecnología (Castells & Pastallé, 2020). Mientras que, el gradiente geotérmico es preciso mencionar que el término se refiere al cómo varía la temperatura con relación a la profundidad de la corteza terrestre, la cual puede estar relacionada con la presencia de elementos químicos radiactivos en las rocas (Torres & Luna, 2023).

Bajo esta mirada técnica, la propuesta de estudio de Torres y Luna (2023) indagan sobre las posibilidades de la geotermia en Colombia como una posibilidad energética, el proyecto se centra en el análisis de la zona oriental del país, en comprensión de los procesos geológicos de la región oriental. De este modo, el proyecto recopila datos referentes a los pozos perforados en la

Diseño de un modelo probabilístico para apoyar el estudio de incertidumbre y riesgo asociado a la ejecución del proyecto de Geotermia en Nereidas como ERNC en la región para CHEC S.A. E.S.P. BIC

cuenca de los Llanos Orientales para el modelado estadístico de las profundidades máximas, conjunto el aprovechamiento energético disponible en estas zonas.

2.1.2 Sistemas de generación de Aprovechamiento Energético

Un yacimiento geotérmico es una zona del subsuelo donde el recurso geotérmico es susceptible de ser aprovechado, estos se clasifican en función de las características del recurso obtenido, su temperatura y la profundidad del mismo:

2.1.2.1 Plantas de vapor seco

Este tipo de centrales eléctricas, también llamadas plantas de energía de vapor seco, operan en regiones donde el recurso geotérmico está presente en una temperatura media-alta, por lo general por encima de los 150°C (Green, 2021). El vapor producido está en estado de saturación o ligeramente gasificado (vapor seco), y se utiliza directamente en las turbinas para la generación de electricidad sin necesidad de ningún tratamiento adicional. (Zenteno, 2022). El costo de producción de este tipo de planta es relativamente bajo debido a que el vapor obtenido se utiliza directamente para generar energía eléctrica (Tecnología y Recursos de la Tierra S.A et al., 2011). La siguiente ilustración muestra cómo funciona este tipo de planta (Salazar et al., 2021).

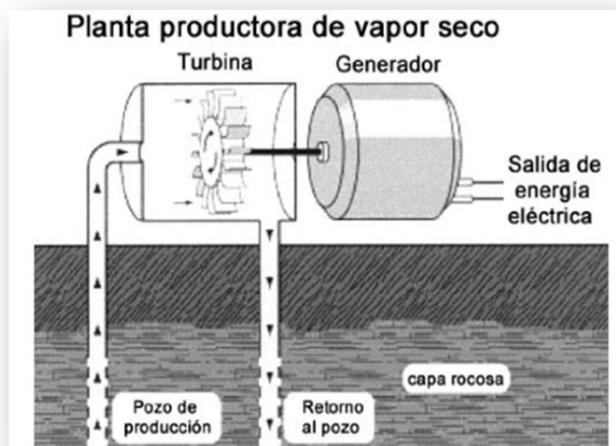


Figura 1 *Planta de generación de vapor seco o directo.* . Nota. Imagen tomada de: Termoquímica I (2011). Elisa Carrión, Juan Palou

2.1.2.2 Plantas de vapor flash

Las plantas de vapor de flash, también llamadas plantas de energía de vapor húmedo, son más adecuadas para recursos geotérmicos compuestos por una mezcla de agua y vapor, los cuales se encuentran en temperaturas superiores a los 180 °C y son accesibles en pozos poco profundos (Lacourt, 2010). La operación de estas plantas implica la separación del líquido del vapor, donde el vapor es conducido a las turbinas para la generación de electricidad, mientras que la fracción líquida, conocida como salmuera, es reinyectada al suelo o utilizada para fines directos, como se muestra en la Ilustración. (Zenteno, 2022)

Diseño de un modelo probabilístico para apoyar el estudio de incertidumbre y riesgo asociado a la ejecución del proyecto de Geotermia en Nereidas como ERNC en la región para CHEC S.A. E.S.P. BIC

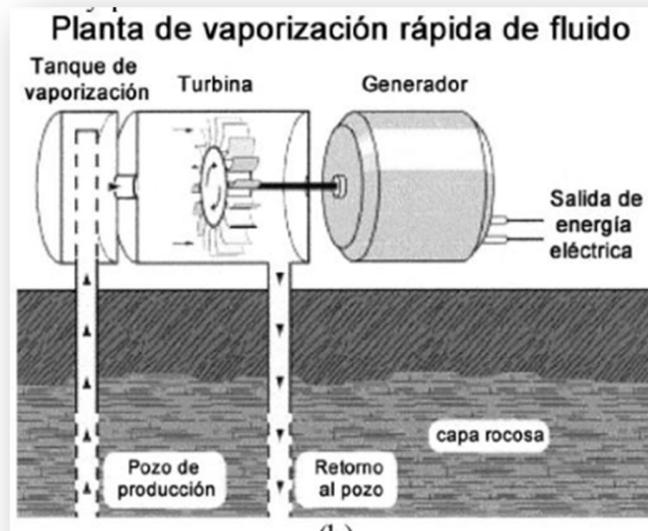


Figura 2 *Planta de generación de Vapor Flash.* . Nota. Tomado de <https://www.tlv.com/global/LA/steam-theory/flash-steam.html>

2.1.2.3 Plantas de ciclo binario

De acuerdo con Llopis & Rodrigo (2011), este tipo de plantas permiten extraer energía de fluidos geotermales con entalpía moderada, cuya temperatura no supera los 180 °C (EPRI, 2010). Al no contar con un recurso de alta temperatura, la generación de energía mediante el uso de las plantas de ciclo binario es realizada haciendo uso de un fluido secundario con un punto de ebullición bajo. El vapor resultante de este intercambio de calor entre el fluido termal y el secundario, es el utilizado para accionar el movimiento de las turbinas para la generación de energía (Lacourt, 2010). La siguiente ilustración indica el funcionamiento de una planta de ciclo binario:

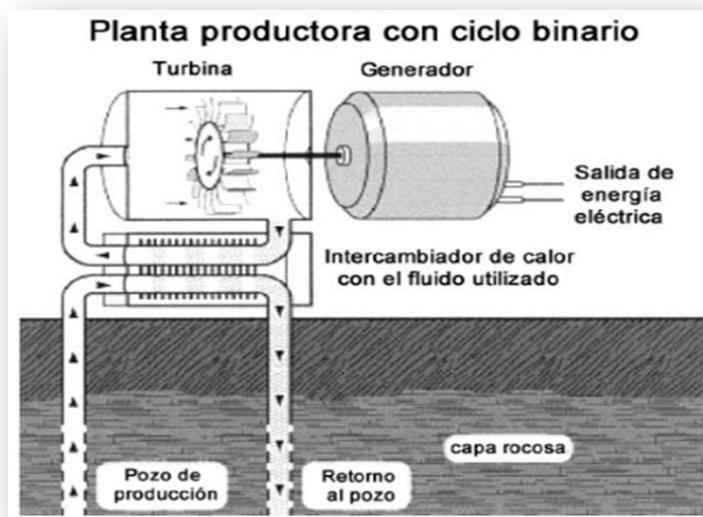


Figura 3. *Planta de Generación de Ciclo Binario.* Nota. Tomado de <https://www.tlv.com/global/LA/steam-theory/flash-steam.html>

Así mismo Gutiérrez y Alvarado (2010), exponen que la energía geotérmica se destaca por su alta disponibilidad de producción, con un factor de planta que oscila entre el 70% y 90%, lo que la convierte en la tecnología con mayor potencial técnico. Esto se refleja en proyectos como los analizados por quienes reportaron factores de capacidad de hasta el 90%. Este es un aspecto para destacar de la energía geotérmica, ya que, en otras energías renovables como la eólica y solar fotovoltaica el factor de planta solo alcanza el 25% y 15%, respectivamente; siendo la energía de biomasa el tipo de energía renovable que sigue a la geotérmica en términos del factor de disponibilidad ubicándose alrededor del 60% (Bazmi & Zahedi, 2011).

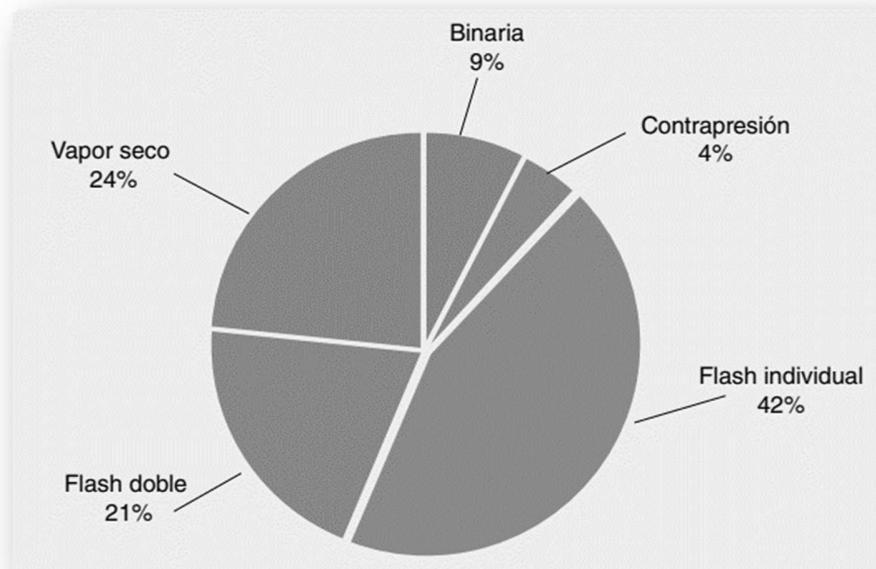


Figura 4. Tipo de planta más utilizada en el mundo. Nota. Datos obtenidos en valoración del tipo de planta más utilizado, información recolectada por el investigador. Adaptación de Bertani 2010

La gráfica permite identificar que las plantas más usadas son las tipo flash, con un 63%, lo que nos permite concluir que la mayor parte del recurso geotérmico es una mezcla entre vapor y agua.

2.1.3 La Geotermia en Colombia

Dentro del proceso de reconocimiento de la geotermia en Colombia, el documento presentado por la BID (2021) amplía la información relacionada a la geotermia, donde explica cómo esta energía se obtiene a partir del aprovechamiento del calor de la tierra, de forma que, se encuentran asociados a estructuras naturales como volcanes o áreas de reciente actividad ígnea y tectónica, por lo que, un yacimiento geotérmico es el lugar donde el agua caliente o vapor se encuentran atrapados bajo una alta presión debajo de una capa estrecha y no penetrable de roca, lo que se calienta por la intrusión magmática debajo del mismo, posible de aprovechar a partir de pozos geotérmicos que llegan hasta el yacimiento geotérmico y se tiene acceso a los fluidos y

vapor caliente, que posteriormente son transferidos por tuberías hasta la planta central eléctrica, después de lo cual los fluidos usualmente se regresan al yacimiento.

A partir de un análisis del sector productivo energético, el documento de Marín & Sánchez (2017) parte del estudio contextual de la geotermia a nivel nacional e internacional, destacando el papel de las políticas en la producción de nuevos enfoques productivos, donde la energía renovable corresponde una figura imperante en el ejercicio de satisfacción de la demanda, conjunto los esfuerzos por reducir la huella ecológica. Bajo este contexto, presenta la siguiente información:

En la fase inicial (exploración) se hace una evaluación del desempeño incluyendo el punto de vista geológico (vulcanológico), una prospección geofísica (eléctrica, gravimétrica, magnética y algunas veces sísmica), a la vez que se analiza el pozo para determinar la geoquímica de aguas y gases. Los datos de dicha valoración son comparados y usados para localizar una reserva que tenga potencial, la cual puede ser identificada plenamente por medio de la fase de perforación. La principal actividad en la exploración profunda es la perforación de pozos, sin embargo, en esta fase, también se desarrolla actividad geocientífica. De tal forma que se define la estratigrafía de los pozos, para ligar el perfil geológico hallado, (por medio de un registro) a los datos hallados en la etapa inicial (Marín & Sánchez, 2017,p.31).

En correspondencia, la investigación liderada por Región Central (2020) presenta entre sus hallazgos, el potencial de una industria que a nivel mundial comienza a ganar interés como consecuencia de la estabilidad productiva que genera sin la limitación ambiental que altera el ejercicio. El proyecto se centra en las posibilidades existentes en el aprovechamiento de la energía geotérmica en la región central del país, puesto que, a la fecha de la investigación solo existe un

Diseño de un modelo probabilístico para apoyar el estudio de incertidumbre y riesgo asociado a la ejecución del proyecto de Geotermia en Nereidas como ERNC en la región para CHEC S.A. E.S.P. BIC

proyecto lo que corresponde al 0.07% en relación a otros proyectos de energía renovable como la solar, biomasa, hidráulico, entre otros.

Durante el estudio del proyecto Geotérmico del Macizo Volcánico del Nevado del Ruiz, ISAGEN en sus informes de gestión verifica la prefactibilidad para la ejecución del mismo encontrando parámetros a tener en cuenta en los cuales se tiene una inversión del proyecto al 2012 corresponde a 1.347 millones de pesos (COP). Por otro lado, entidades como el Servicio Geológico Colombiano en sus reportes ha buscado la forma de ampliar las regiones y establecer nuevos planes para dar un panorama más amplio al uso de la energía geotérmica. Si citamos algún ejemplo observamos en la reunión nacional geotérmica efectuada en la ciudad de Manizales del año 2017 buscando la incorporación de nuevas áreas de potencial geotérmico. (Central, 2020, p.36)

En complemento, el proyecto de Gil (2019) analiza el impacto que tiene la geotermia como fuente energética en respuesta al incremento de la población y de la notoria expansión de la manufactura, producto del consumo masivo y la internacionalización de las marcas, conjuntamente la producción de nuevos procesos y productos dependientes del contexto digital, donde la energía es la matriz de funcionamiento. Con esta perspectiva, la propuesta realiza una exploración de distintas fuentes bibliográficas referente a la geotermia, su aplicación y actualidad a nivel internacional y nacional, en beneficio de un contexto que refleje el potencial que tiene este tipo de energía.

Tabla 1 *Proyectos de Geotermia en Colombia*

Áreas geotérmicas Convectivas	Estado
Complejo volcánico Cerro Bravo – Cerro Machín (CVCBCM): Nereidas – Botero Londoño	Pre factibilidad
CVCBCM: Machín	Reconocimiento
CVCBCM: Laguna del Otún	Reconocimiento
CVCBCM: Cerro Bravo	Reconocimiento
CVCBCM: Falla Villamaría – Termales	Reconocimiento
CVCBCM: Santa Rosa – San Vicente	Reconocimiento
Chiles-Cerro Negro	Pre factibilidad
Azufral	Pre factibilidad
Paipa	Pre factibilidad
Galeras	Reconocimiento
Puracé	Reconocimiento
Sotará	Reconocimiento
Doña Juana	Reconocimiento
Huila	Reconocimiento
San Diego	Pre factibilidad temprana
Sibundoy	Sin datos

Nota. Tomado del documento, Geotermia en la Región Central (2020). p.36

Lo anterior, responde a un contexto específico como lo es el Plan de Expansión de Generación y Transmisión 2013-2027, elaborado por la Unidad de Planeación Minero-Energética que manifiesta la necesidad de introducir nuevas fuentes de generación de energía, ello basado en la dependencia que se tiene de los sistemas hidroeléctricos y los sistemas de combustión; así plantea la urgencia de hacer uso de recursos renovables que posibiliten el acceso a la energía en las zonas más apartadas (Gil, 2019). Consolidando una oportunidad para la introducción de la geotermia como alternativa energética con beneficios a las regiones con riesgos menores.

2.2 Antecedentes Internacionales

2.2.1 Países Líderes en Geotermia

A nivel internacional, la preocupación por el cambio climático se ha convertido en una labor estatal donde los sectores más influyentes, como el energético, contribuyen a su transformación, dicha transformación se ha configurado en nuevos modelos comerciales de expansión y producción técnica, en el caso de la energía geotérmica con el incremento natural del

Diseño de un modelo probabilístico para apoyar el estudio de incertidumbre y riesgo asociado a la ejecución del proyecto de Geotermia en Nereidas como ERNC en la región para CHEC S.A. E.S.P. BIC

consumo de electricidad, su incremento ha sido notorio, principalmente a su demanda entre el 4% y 5% a nivel anual.

Dentro de este espectro, la generación de energía geotérmica en electricidad el líder a nivel continental de producción es América con una capacidad instalada de 5089 (MWe), donde, el mayor aportante es Estados Unidos con 16.600 (GWh), seguido por el continente asiático. Bajo el marco de las energías renovable, Blanco (2020) define que:

En los últimos 5 años agregaron 350 [MWe]. La inversión, los créditos fiscales de producción de 0.2 cents/kWh y las normas sobre cartera de renovables son el mantenimiento de una tasa de crecimiento de 3.6% anual. La energía geotérmica sigue siendo un pequeño contribuyente a la capacidad de energía eléctrica, y la generación en los Estados Unidos, con un aporte de 0.48% de generación total. (p.3)

La capacidad total instalada de generación de energía geotérmica a fines de 2022 fue de 16.127 MW, un aumento de 286 MW con respecto a 2021. Con lo que, solo 8 países agregaron capacidad de generación de energía geotérmica con un total de 16 plantas adicionales. Kenia (83 MW), Indonesia (80 MW) y EE. UU. (72 MW) mostraron el mayor crecimiento. Nicaragua vio la adición de 10,4 MW justo antes de fin de año. Se informaron otras adiciones en China, Filipinas y Japón (Thinkgeoenergy,2023).

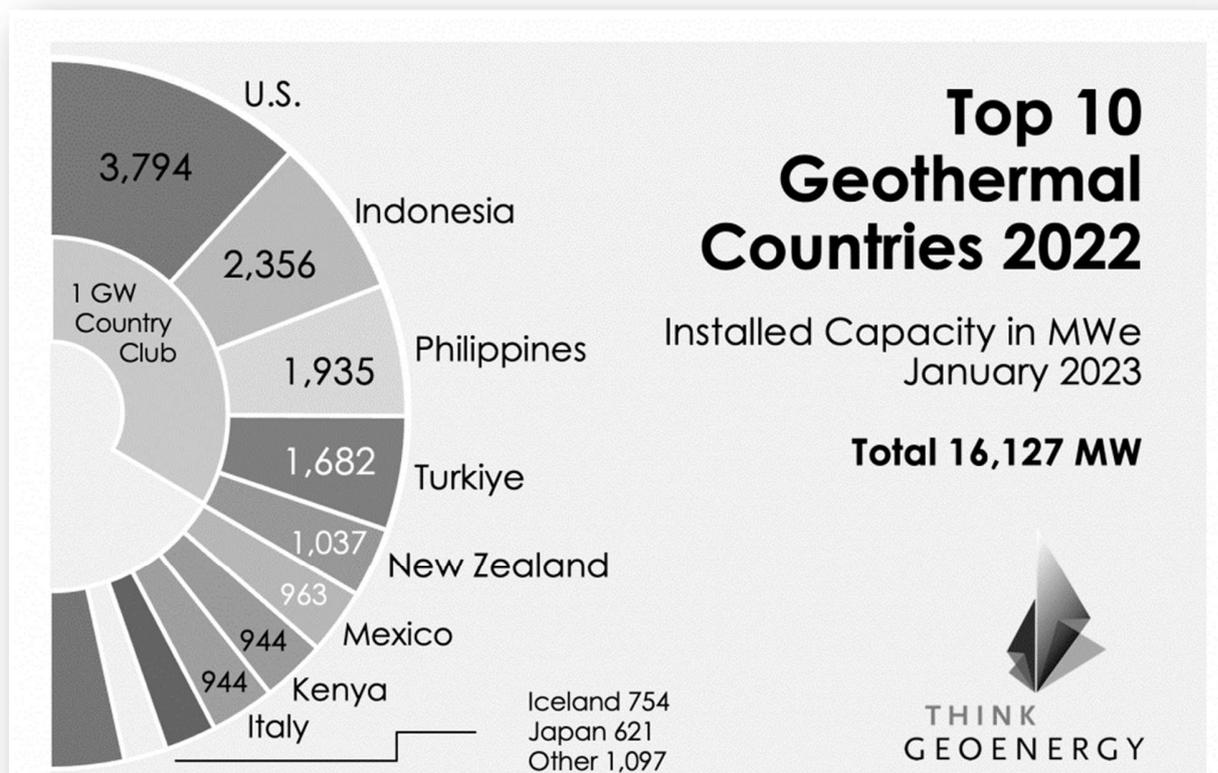


Figura 5. Ranking de *Top 10 Geothermal Countries 2022*. Fuente (basado en Think Geoenergy).

La siguiente figura presenta los países con mayor inversión en fuentes de energía geotérmicas, la información fue tomado de: Thinkgeoenergy Research (2023)

2.2.2 Estudios sobre Geotermia

Con lo anterior, el artículo de Santamaría (2020) explora la energía geotérmica mediante la descripción de los procesos para su extracción, conjuntamente los recursos necesarios para el desempeño de esta industria, en caracterización de conceptos claves como: reserva, estructura, excavación, temperatura. La descripción de estos elementos resulta determinante en el ejercicio logístico de la extracción de la energía bruta en los yacimientos energéticos, puesto que, identificado el recurso geotérmico, se debe continuar con la exploración superficial, tarea

Diseño de un modelo probabilístico para apoyar el estudio de incertidumbre y riesgo asociado a la ejecución del proyecto de Geotermia en Nereidas como ERNC en la región para CHEC S.A. E.S.P. BIC

multidisciplinar que incluye la información recolectada mediante el levantamiento cartográfico, geoquímico y geofísico del terreno.

Posterior a la fase de exploración superficial y perforación se procede a la creación de un modelo conceptual que permita establecer el recurso potencial, conjunto el costo de la actividad en validación de las influencias externas, de este modo, crear diseños preliminares y estimaciones de costo para la perforación. /

En contribución a la idea de la geotérmica como base para una nueva fuente de energía renovable, la investigación de Fridkinsson et al (2017) describe las estimaciones referente a los factores de emisión GEI en planta de energía geotérmica, desde un marco general y local. Destacando entre sus hallazgos que:

Se necesitan más estudios para comprender mejor los cambios de las emisiones de GEI de las plantas de energía geotérmica a lo largo del tiempo, a fin de cuantificar la disminución gradual de las emisiones de GEI comúnmente observadas y los cambios en las emisiones difusas de GEI en respuesta a la producción de energía. Puesto que, la limitada evidencia disponible indica que las emisiones difusas de GEI a través del suelo en los campos geotérmicos puede aumentar o disminuir en respuesta a la producción de energía geotérmica. Las predicciones de emisiones futuras de las plantas de energía geotérmica se complican por una serie de procesos que pueden interactuar de manera compleja causar cambios significativos en las emisiones de GEI de las plantas de energía geotérmica a lo largo del tiempo, como la formación de almohadas de vapor, la inyección de gases magmáticos y retorno de fluido de reinyección. (p.10)

A partir de una perspectiva no solo ambiental sino coyuntural como el fenómeno del covid-19, el artículo de Choma'c et al (2022) define la oportunidad de desarrollar una industria energética

donde, países como Polonia, Lituania, Letonia y Estonia jueguen un papel determinante en el abastecimiento energético de Europa; de modo que, se parte del estudio del mercado de la energía para la contextualización de las condiciones para la inversión y desarrollo de la energía geotérmica en Polonia. Logrando destacar que, El estado diagnosticado del sector de la energía geotérmica en los Estados polacos y bálticos mercados revela potencial para un mayor desarrollo de las tendencias observadas.

2.2.3 Experiencias Internacionales

En este subcapítulo se realizará una breve descripción de las principales características geográficas con las que cuentan algunos de los países con potencial de generación de energía geotérmica. Se presenta además la definición de los diferentes sistemas de generación utilizados para este fin, los principales aspectos de los proyectos en energía geotérmica y las variables de modelación identificadas en la literatura. También se estudian las normativas vigentes en Colombia, identificando las condiciones especiales que presentan estos proyectos, específicamente los beneficios tributarios e incentivos.

La geotermia se define como el calor o energía que es producida a partir del interior de la Tierra (Santoyo y Barragán, 2010). El agua es la energía que se encuentra en el fluido geotérmico y puede estar en diferentes estados como líquido, vapor o una mezcla de estos, encontrándose a más de 1,000 metros de profundidad (Zenteno, 2022). De acuerdo a la temperatura del fluido, este puede clasificarse como de alta entalpía, con una temperatura que supera los 200 grados centígrados; de mediana entalpía si se encuentra en un rango de 100 a 200 grados centígrados, o considerado de baja entalpía si la temperatura alcanza a lo sumo los 100 grados centígrados (Santoyo y Barragán, 2010).

La existencia de recursos geotérmicos de alta temperatura está estrechamente relacionada con factores geológicos como la actividad sísmica, la formación de cordilleras y la presencia de volcanes, entre otros (Tecnología y Recursos de la Tierra S.A et al., 2011). Estos factores están vinculados a los procesos de subducción, que ocurren mayormente en el "Cinturón de Fuego del Pacífico", el cual atraviesa numerosos países, incluyendo Estados Unidos, México, Guatemala, El Salvador, Honduras, Nicaragua, Costa Rica, Panamá, Colombia, Ecuador, Perú, Bolivia, Chile, Nueva Zelanda, Micronesia, Papua Nueva Guinea, Indonesia, Filipinas, China, Japón y Rusia. Debido a su ubicación en esta región, estos países tienen un gran potencial para la generación de energía geotérmica (DiPippo, 2015).

Indonesia se encuentra en el Cinturón de Fuego del Pacífico y cuenta con más de 312 zonas con potencial geotérmico, lo que se traduce en una capacidad de generación que supera los 28,000 MW, convirtiéndolo en el país con la mayor capacidad de generación geotérmica a nivel mundial, representando aproximadamente el 40% del recurso geotérmico global. El país también alberga 117 volcanes activos, lo que permite la producción de energía geotérmica mediante sistemas hidrotermales, con temperaturas que pueden superar los 225 grados centígrados y en algunos casos no exceden esta temperatura (Zenteno, 2022).

Por otra parte, Islandia es reconocido como uno de los países cuyo suministro de energía es totalmente renovable, siendo este abastecido principalmente mediante energía hidráulica y geotérmica, esta última con una participación del 27% en la matriz de generación eléctrica de este país (Spittler et al., 2020). A pesar de no estar ubicado dentro del Cinturón de Fuego del Pacífico, la corteza terrestre de Islandia considera grandes fallas geológicas que cruzan a lo largo de todo el país, como consecuencia de la separación de las placas euroasiática y norteamericana que

atraviesan la isla, y que cada año se separan la una de la otra a una distancia aproximada de 2 centímetros (DiPippo, 2015).

2.3 Marco Regulatorio Colombiano

El marco legal y regulatorio de un sector proporciona las reglas del juego con las que deben participar los actores del mismo, es así como, a través este marco se definen las conductas que deben tener las partícipes en cada etapa del proyecto.

No menos importante es señalar que desde la Constitución de 1991, se determinó la necesidad de intervención por parte del Estado en las actividades relacionadas con servicios públicos, como un elemento esencial que permitiera (i) dar apertura a la competencia privada en materia de proyectos de energía y (ii) mantener control durante este proceso de apertura, de allí la creación de la CREG.

“La Ley preceptúa que constituyen instrumentos para intervención estatal en los servicios públicos, todas las funciones asignadas a las entidades, especialmente: en la promoción a empresas que ofrezcan los servicios públicos, a la gestión y obtención de recursos, a la regulación de la prestación de acuerdo con cada región, a la fijación de metas de cobertura y calidad, a la definición del régimen tarifario, a la organización de sistemas de información , a la capacitación y asistencia técnica, a la protección de los recursos naturales, al otorgamiento de subsidios, al estímulo a la inversión privada y al control y vigilancia ejercida por la SSPD y a la regulación por las Comisiones de Regulación” (Amador, 2011).

Así las cosas, la intervención del estado en proyectos de Geotermia se realiza a través de la normatividad que a continuación se presenta.

Tabla 2. Marco Normativo

Normativa	Descripción	Análisis contexto del proyecto de Geotermia
Ley 99 de 1993	Se creó el Ministerio del Medio Ambiente, cuya principal función fue realizar toda la gestión para la protección del medio ambiente y los recursos naturales renovables del país	De las tres grandes reformas que esta ley ha instaurado referentes, a asignación de funciones a ministerio y corporaciones ambientales, la consagración de licencias ambientales, y desarrollo de la participación ambiental, se determina que dada su regulación y naturaleza el licenciamiento ambiental contextualiza el inicio, el punto de partida de la exploración geotérmica con fines de generación de energía.
Ley 142 de 1994	La Ley de Servicios Públicos Domiciliarios, y la ley 143 de 1994, por la cual se creó la “División de Ahorro, Conservación y Uso Eficiente de la Energía”, como dependencia del Instituto de Asuntos Nucleares y Energías Alternativas (INEA), que estaba orientada principalmente a la demanda de energía y le asignó a la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) la función de establecer la forma de satisfacer la demanda energética, teniendo en cuenta los recursos existentes, los cuales se clasifican en convencionales y no convencionales.	En el contexto de asegurar que se presten a los habitantes del territorio, de manera eficiente, los servicios domiciliarios en este caso, de energía eléctrica, esta ley satisface el derecho al servicio público y en otrora en el Pacto por la Justicia Tarifaria creada por el ministerio de minas y energía en septiembre de 2022, el proceso de generación geotérmica concluye una reducción en las tarifas de energía, por el método y uso de recursos naturales renovables eficientes en términos económicos y ambientales.
Ley 508 de 1999	Se expide el Plan Nacional de Desarrollo 1999- 2002, y- el Artículo 6° relaciona los principales proyectos de inversión del Plan Nacional de Inversiones Públicas y en entre ellos se mencionan: El proyecto Azufral y el proyecto Las Nereidas, que ya corresponden a energía geotérmica.	Esta ley permitió evaluar si los objetivos del gobierno se ajustan a las propuestas de Geotermia, accedió la discusión sobre el rumbo que debe tomar la política pública nacional en términos de producción de energía por métodos de subsuelo y significó el inicio para proveer los lineamientos estratégicos de las políticas públicas formuladas por el presidente para plan de inversiones de Geotermia.
Ley 697 de 2001	Mediante la cual se promueve la utilización de energías alternativas y se da al Uso Racional y Eficiente de Energía (URE) el carácter de interés general, precisa el alcance de las energías renovables y alternativas, y a nivel institucional, asigna en cabeza del Ministerio de Minas y Energía, la responsabilidad de la promoción y adopción de programas que aseguren el uso racional y eficiente de este	Esta Ley habilita y sugiere la importancia de energías alternativas que están basadas en la utilización de recursos naturales como: el sol, el viento, el agua o la biomasa o calor del subsuelo las cuales se caracterizan por no utilizar combustibles fósiles, sino recursos naturales capaces de renovarse ilimitadamente. Adicionalmente, la aplicación de estas energías generó aspectos potenciales a nivel mundial debido a las marcas que se están

Normativa	Descripción	Análisis contexto del proyecto de Geotermia
	<p>recurso. Se crea el Programa para la promoción del Uso Racional y eficiente de energía (PROURE), y define las energías alternativas a considerar: solar, eólica, geotérmica, biomasa y las pequeñas centrales hidroeléctricas que no superen los 10 MW</p>	<p>dando en el cambio climático, que fundamentalmente ocurre por la utilización de combustibles fósiles.</p> <p>Los países a nivel mundial han adoptado el cambio del modelo energético tradicional a un modelo apoyado en fuentes limpias, teniendo Colombia gran oportunidad por sus características geográficas.</p>
<p>Ley 788 de 2002</p>	<p>Esta Ley busca incentivar la inversión en la producción de energía alternativa y para ello exime de impuesto a la renta durante 15 años a las empresas que vendan energía eléctrica obtenida a partir de biomasa, viento y residuos agrícolas, exige que la reducción sea certificada en los términos del Protocolo de Kioto y que además se invierta el 50% de los ingresos de la venta en obras de beneficio social. Igualmente exime del IVA, la importación de maquinaria y equipos con destino al desarrollo de estos proyectos</p>	<p>Con la Ley 788 de 2002 se busca atraer inversiones nacionales y extranjeras al país. Para lograrlo, estableció beneficios fiscales significativos para las empresas que invirtieran en sectores específicos de la economía, como la construcción, la infraestructura, la minería y la industria manufacturera. De modo que, se otorgue beneficios tributarios a las empresas que realizaran inversiones en proyectos de gran envergadura. Esto incluyó la exención del impuesto a la renta durante un período de tiempo determinado y la posibilidad de amortizar costos de inversión.</p>
<p>Ley 1665 de 2013</p>	<p>Con esta norma se aprueba la creación para Colombia del Estatuto de la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA), el cual fue realizado en Bonn –Alemania en el 2009 y que buscó generar una política 44 mundial común para todos los países que lo adopten y que promueve la protección del medio ambiente y el generar estrategias para la protección de la capa de ozono.</p>	<p>La Ley 1665 de 2013 refleja el firme compromiso de Colombia con la promoción de las energías renovables y la preservación del medio ambiente al sumarse al Estatuto de IRENA. Esta adhesión no solo muestra la voluntad del país de impulsar fuentes de energía limpias y sostenibles, como la solar y la eólica, sino que también abre las puertas a valiosas oportunidades de colaboración a nivel internacional.</p> <p>La participación de Colombia en IRENA implica un compromiso global con la búsqueda de soluciones para mitigar el cambio climático y promover la transición hacia una matriz energética más verde. Esta cooperación internacional puede llevar a avances significativos en tecnologías limpias y en la adopción de mejores prácticas en el ámbito de las energías renovables.</p>
<p>Ley 1715 de 2014</p>	<p>Esta norma regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético</p>	<p>La Ley mencionada regula la incorporación de las energías renovables no convencionales en el sistema energético nacional de Colombia.</p>

Normativa	Descripción	Análisis contexto del proyecto de Geotermia
	<p>nacional. 4.2.3 Decreto. Decreto reglamentario 3683 de 2003, crea la Comisión Intersectorial (CIURE) presidida por Ministerio de Minas y Energía, integrada por los ministerios de Comercio, Industria y Turismo, el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, el Departamento Nacional de Planeación, la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG), Colciencias y el Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas No Interconectadas(IPSE), con funciones de coordinación de las políticas que diseñe cada entidad en lo de su competencia, además de impulsar programas y proyectos, con destino efectuar el seguimiento del Programa de Uso Racional y Eficiente de Energía(URE).</p>	<p>Además, el Decreto 3683 de 2003 establece la creación de la Comisión Intersectorial (CIURE), presidida por el Ministerio de Minas y Energía, que está compuesta por varios ministerios y entidades gubernamentales. La CIURE tiene la responsabilidad de coordinar las políticas relacionadas con las energías renovables, impulsar programas y proyectos, supervisar el Programa de Uso Racional y Eficiente de Energía (URE) y gestionar recursos a nivel nacional e internacional, entre otras funciones. En conjunto, estas regulaciones buscan promover y facilitar la integración de fuentes de energía renovable en el sistema energético de Colombia.</p>
<p>Ley 2099 de 2021</p>	<p>En relación con el desarrollo de la energía Geotérmica, se complementa lo previsto en la ley 1715 de 2014 en el sentido de facultar a Minminas para que, directa o indirectamente, determine los requisitos y requerimientos técnicos que han de cumplir los proyectos de exploración y de explotación del recurso geotérmico para generar energía eléctrica; y establece que será dicho Ministerio quien realice el seguimiento y control del cumplimiento de dichos requisitos y requerimientos técnicos e imponer las sanciones a las que haya lugar de acuerdo con la Ley 2099 y conforme a la enunciación de determinadas conductas establecidas en la misma.</p>	<p>La Ley 1715 de 2014 y las disposiciones relacionadas con la energía geotérmica destacan el papel central de Minminas en la regulación y supervisión de los proyectos geotérmicos con el objetivo de garantizar su cumplimiento de los requisitos técnicos y de seguridad. Además, establece un marco para la imposición de sanciones en caso de incumplimiento. Esto subraya la importancia de la regulación y la seguridad en el desarrollo de la energía geotérmica en Colombia.</p>
<p>Decreto 2501 de 2007</p>	<p>Por medio del cual se dictan disposiciones para promover prácticas con fines de uso racional y eficiente de energía eléctrica.</p>	<p>La normativa se enfoca en la protección y gestión sostenible de las aguas subterráneas en Colombia. Establece regulaciones para prevenir la contaminación, promueve la coordinación interinstitucional y establece un marco para la autorización y registro de actividades relacionadas con este recurso hídrico. Su objetivo es asegurar la</p>

Normativa	Descripción	Análisis contexto del proyecto de Geotermia
		disponibilidad de aguas subterráneas de calidad para las necesidades actuales y futuras, así como proteger los ecosistemas acuáticos relacionados.
Decreto 1318 de 2022	<p>Sección 9 Geotermia: La presente Sección tiene por objeto adoptar los lineamientos a fin de incentivar la exploración y explotación del Recurso Geotérmico para la generación de energía eléctrica, así como para fomentar el conocimiento del subsuelo.</p> <p>(i) La energía geotérmica se considerará como Fuente no Convencional de Energía Renovable (FNCER).</p> <p>(ii) Evaluación del potencial de la geotermia. El Gobierno nacional pondrá en marcha instrumentos para fomentar e incentivar los trabajos de exploración e investigación del subsuelo con el fin de conocer el Recurso geotérmico.</p>	Esta sección de la normativa sienta las bases para el desarrollo de la energía geotérmica en Colombia. Reconoce la importancia de esta fuente de energía como renovable y sostenible, y establece el compromiso del gobierno de promover la evaluación y exploración de los recursos geotérmicos. La promoción de la geotermia es coherente con los esfuerzos para diversificar la matriz energética y reducir la dependencia de combustibles fósiles, lo que contribuye a la sostenibilidad ambiental y energética del país.
Resolución 40302 de 2022	Por la cual se establecen los requisitos técnicos que regirán el registro geotérmico y los permisos de exploración y explotación del recurso geotérmico con fines de generación eléctrica.	Esta normativa establece los requisitos técnicos que deben cumplir el registro geotérmico y los permisos relacionados con la exploración y explotación de recursos geotérmicos con el propósito de generar electricidad.

Nota. Elaborado por el investigador con información competente a la jurisprudencia nacional de Colombia.

A pesar de algunos avances relevantes en la maduración de la legislación y regulación sobre proyectos de geotermia, todavía falta implementar medidas para incentivar la exploración e investigación del subsuelo en búsqueda del recurso geotérmico, como lo indica el Decreto 1318 de 2022. Sin estos estímulos, disminuye la probabilidad que los inversionistas se interesen en estos proyectos, ya que tendrían que asumir el riesgo de exploración por sí mismos.

Ahora bien, podría pensarse que estas herramientas ya existen en la Ley 1715 de 2014, porque ella regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional, no obstante, sus preceptos resultan insuficientes para la generación geotérmica, toda vez que la norma asume que todos los proyectos desde un principio son factibles, en la medida que hay claridad desde los diseños iniciales en la capacidad instalada y resultado de la energía que ha de generarse, pero esta premisa no aplica para los proyectos de geotermia pues es bien sabido que estos conllevan un nivel de riesgo más amplio porque la exploración inicial puede ser fallida, aun cuando cuente con estudios iniciales que indiquen la existencia del recurso natural.

2.4 Empresa y Proyecto Valle de Nereidas

CHEC S.A. E.S.P. BIC es una empresa que forma parte del Grupo Empresarial EPM y se dedica exclusivamente a prestar servicios públicos domiciliarios en Colombia, específicamente en el sector de la energía eléctrica. La empresa tiene la responsabilidad de proporcionar el servicio de energía eléctrica en áreas urbanas y rurales de los departamentos de Caldas y Risaralda, cubriendo 40 municipios, 63 corregimientos y 22 comunidades étnicas. Además de sus actividades principales, la empresa busca oportunidades para ofrecer otros productos, bienes y servicios que sean de interés o beneficio para sus clientes y usuarios, y que le permitan capturar valor en el mercado. CHEC está comprometida con el desarrollo sostenible de las poblaciones que atiende y ofrece cobertura del servicio de energía a 1.502.607 habitantes, contando con un mercado de 525.420 clientes facturados hasta el 2022, lo que demuestra su compromiso con la calidad y la excelencia en la prestación de sus servicios. (CHEC, 2022). Estas cifras implican para la organización la adopción de estrategias y actividades que cumplan las necesidades actuales de la

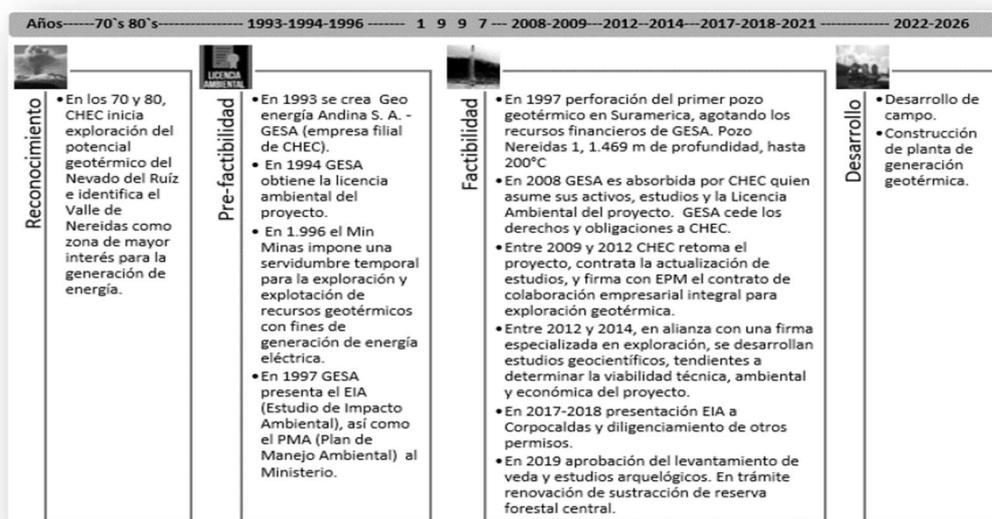
empresa y de sus grupos interés, es por ello que CHEC en sus declaraciones estratégicas incluye acciones desde la identidad, la acción y los resultados que permitan la permanencia en el tiempo, el desarrollo de territorios sostenibles y competitivos.

CHEC ha decidido incursionar en el campo de la energía geotérmica por varias razones:

- Acceso a ingresos por Cargo por Confiabilidad por la disponibilidad de activos de generación.
- Necesidad de diversificar la canasta energética de la empresa, actualmente hídrica y térmica.
- Congruencia con su “Declaratoria de Compromiso con el Cambio Climático”.
- Energía Geotérmica, ERNC (Energías Renovables No Convencionales) que ofrece alta firmeza al sistema interconectado nacional.
- Potencial geotérmico en la zona según estudios previos de CHEC.
- Incentivos para la generación de energía con ERNC y fondos para financiar perforaciones exploratorias.

Antecedentes y evolución del proyecto

Tabla 3 *Antecedentes del Proyecto Geotérmico. Nota. Información obtenida por medio de la revisión de informes creado por el investigador*



Diseño de un modelo probabilístico para apoyar el estudio de incertidumbre y riesgo asociado a la ejecución del proyecto de Geotermia en Nereidas como ERNC en la región para CHEC S.A. E.S.P. BIC

Respecto al proyecto Geotérmico en ingeniería conceptual a continuación se detallan algunos datos de contexto:

Localización: Valle de Nereidas (Villamaría, Caldas), Colombia

Fuente de Recurso: Energía Geotérmica.

Desarrollador: CHEC S.A. E.S.P. actualmente con memorando de entendimiento, MOU por sus siglas en inglés: Memorandum of Understanding con Ecopetrol y Baker Hughes, para la perforación del pozo inicial en el año 2024.

Descripción: Perforación de 12 pozos de producción en total, en los que se incluyen 5 pozos exploratorios, y así mismo, perforación de 9 pozos de reinyección, todos con una profundidad entre 1800 a 2500m en zonas donde pudiera existir un acuífero geotérmico con temperaturas entre 250°C y 270 °C, que permitan la generación de energía eléctrica.

Área de exploración: 5.385,31Ha y se encuentra con licencia ambiental para el polígono.

Tecnología: Planta Flash, o Binaria.

Potencial de producción: Capacidad de 65MW con un factor de planta aproximado 97%.
540.000MW/año, con posibilidad que sea escalable desde 25MW – 65 MW.

Tiempo de ejecución: 60 meses (construcción)

Actividades:

- Mejora vía existente de 48.21 km; nuevas vías por 3.5 km; 5 Plataformas + ZODME (7,21 Ha); Perforación 5 pozos; 5 sitios de toma de agua. temporal; ejecución del Plan de Manejo Ambiental (PMA).

Diseño de un modelo probabilístico para apoyar el estudio de incertidumbre y riesgo asociado a la ejecución del proyecto de Geotermia en Nereidas como ERNC en la región para CHEC S.A. E.S.P. BIC

especificada como “valor verdadero sino a un intervalo de valores que pueda ser razonablemente asociado al resultado” definición tomada del Vocabulario Internacional de Metrología.

Otra definición importante lo establece como el “Parámetro asociado al resultado de una medida, que caracteriza la dispersión de los valores que podrían razonablemente ser atribuidos al mensurando”. Definición tomada de la Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida (GUM).

Entendiendo ahora el riesgo, es una medida de la magnitud de los daños frente a una situación peligrosa. El riesgo se mide asumiendo una determinada vulnerabilidad frente a cada tipo de peligro, una definición la describe como “potencial de que una amenaza específica explote las debilidades de un activo o grupo de activos para ocasionar pérdida y/o daño a los activos. Por lo general se mide por medio de una combinación del impacto y la probabilidad de ocurrencia” (CCN, 2015, pág. 756).

Entender la incertidumbre, sus rangos, los métodos de análisis; comprender los riesgos y las medidas pertinentes frente a su impacto en el proyecto,

2.5.1 Incertidumbre y riesgo

Las fuentes de incertidumbre pueden variar en su origen, ya que pueden surgir tanto de los datos de efectividad como de los costos obtenidos de diversas fuentes, como la literatura científica o el contexto específico en el que se lleva a cabo la investigación. Estas fuentes de incertidumbre a menudo están relacionadas con errores o sesgos que resultan de los procesos de selección y seguimiento de los pacientes, la información proporcionada por los observadores o entrevistadores, entre otros factores (Ferriols & Alós, 2011). La recopilación y el registro de información sobre la incertidumbre de los datos de entrada es fundamental para el éxito y la transparencia del análisis de incertidumbre (Hiraishi et al., 2013).

El desarrollo del concepto de riesgo ha sido objeto de estudio por diversas disciplinas a lo largo de la historia. Según ECON-IT (en línea), el término se empezó a definir aproximadamente en el 3200 A.C., cuando un grupo de personas llamados Asipu, aconsejaban a la gente que estaba tomando decisiones difíciles o inciertas en el Valle del Tigris y el Éufrates. Por su parte, Briones (2005) señala que “el concepto comienza a desarrollarse con la idea de prudencia y seguridad en el siglo XVII, con la posibilidad que tiene el hombre de elegir su destino”(Chávez, 2018).

En la década de los ochenta del siglo pasado, la sociedad tomó conciencia de la dimensión y diversidad de los riesgos a los que se enfrenta la humanidad, lo que llevó a proponer a Georges Yves Kervern en 1987 el neologismo Cindyniques como una disciplina que estudia los riesgos, también llamada “la ciencia del peligro”(Morín & Le Moigne, 2006). De modo que, el concepto de riesgo se ha forjado en el pensamiento occidental del capitalismo y la teoría económica, lo que hace que la economía sea una de las disciplinas pioneras en el cálculo del riesgo.

Así las cosas, el estudio de la Estadística para su mejor estudio se ha dividido en tres grandes ramas: Estadística Descriptiva, Probabilidades y la Estadística Inferencial. La Estadística Descriptiva consiste en la presentación de datos en forma de tablas y gráficas. Esta comprende cualquier actividad relacionada con los datos y está diseñada para resumir o describir los mismos, sin factores pertinentes adicionales; esto es, sin intentar inferir nada que vaya más allá de los datos, como tales. Es en general utilizada en la etapa inicial de los análisis, cuando se tiene contacto con los datos por primera vez. (Orellana, 2001).

Como consecuencia, la característica más importante del reciente crecimiento de la estadística ha sido un cambio en el énfasis de los métodos que describen a métodos que sirven para hacer generalizaciones. La Estadística Inferencial investiga o analiza una población partiendo de una muestra tomada. La Estadística descriptiva y la inferencial comprenden la estadística aplicada.

Hay también una disciplina llamada estadística matemática, la cual se refiere a las bases teóricas de la materia, e incluye el estudio de las probabilidades.

Con esta perspectiva, el proyecto de estudio de Jaramillo & Solano (2019) aporta desde un estudio general de la energía la relación entre los proyectos y el riesgo, principalmente a partir de medios no convencionales como lo son las energías renovables. En el caso del campo energético, la generación de electricidad cuenta con variables como las condiciones climáticas, el alcance del proyecto y la capacidad tecnológica.

De forma que, Jaramillo & Solano (2019) expresa que:

Algunos de los riesgos más relevantes son los siguientes: desviaciones en la ruta crítica causada por la incertidumbre existente en la negociación con las comunidades afectadas por el proyecto; falta de claridad en el proceso de gestión de cambios; fallas en la gestión social que produzcan manifestaciones en su contra; falta de experiencia de los patrocinadores para la administración de un proyecto de esta magnitud, especialmente en la toma de decisiones, la resolución de litigios, conflictos o disputas entre los contratistas. (p.58)

En ese sentido, es importante sintetizar que este concepto de riesgo se refiere a la posibilidad de que ocurran eventos futuros no deseados que puedan afectar negativamente la ejecución de un proyecto (Villasmil, 2019). Ahora bien, específicamente en el caso de la energía geotérmica, existen múltiples riesgos asociados, como la variabilidad de la producción de energía debido a la incertidumbre en la temperatura y la permeabilidad del yacimiento geotérmico, la disponibilidad de recursos geotérmicos a largo plazo, la volatilidad de los precios de los combustibles fósiles y las políticas energéticas y ambientales cambiantes (Vivas, 2021).

Con esta perspectiva, la investigación de Vivas (2021) establece una línea cronológica del consumo energético a nivel mundial, de esta forma, determina la demanda a nivel latino américa, con lo que, el aprovechamiento de la geotermia en Colombia a la actualidad es la actualización de un proceso iniciado en los años 70, donde, se indagó sobre el potencial energético del país, donde se destacan zonas con gran potencial como el Cerro Negro y Tufiño, Paila y el Nevado del Ruiz, sin embargo, pese a los estudios realizados en las últimas décadas, a la actualidad no existen proyectos en Colombia relacionados a la generación energía eléctrica a partir del recurso geotérmico.

Bajo este espectro, la inversión de este tipo de proyectos hace alusión a la incertidumbre, vale la pena exponer la estrecha relación que existe entre este concepto respecto a la falta de información completa o la imprevisibilidad de los resultados futuros. En ese orden y en el contexto de los proyectos de energía geotérmica, esta incertidumbre suele estar asociada con factores como la falta de datos precisos sobre el yacimiento geotérmico, la variabilidad de los precios de mercado, la viabilidad técnica y económica de la tecnología geotérmica, así como los cambios regulatorios y legales (Ruiz et al., 2021).

Bajo esta línea, la investigación de García, (2021) complejiza el proceso de inversión en el sector energético principalmente en proyectos de energías renovables dentro de un mercado eléctrico competitivo, desde una mirada de la diversificación y la complementariedad de los recursos. Con lo que, el documento indaga las variables para la toma de decisiones para que un inversionista pueda tomar una decisión teniendo como base la flexibilidad e incertidumbre. Por lo que, la relación de complementariedad entre los recursos es un factor de ayuda para la toma de decisiones, puesto que el juego de opciones brinda oportunidades para los inversores.

Así mismo, es fundamental evaluar y gestionar tanto el riesgo como la incertidumbre en la planificación y ejecución de proyectos de esta índole, así como también darle una especial atención desde el punto de vista administrativo-financiero en cuanto a los aspectos que indican o no viabilidad del proyecto. Para ello, es necesario utilizar enfoques probabilísticos que permitan cuantificar y analizar los posibles escenarios y resultados, considerando la distribución de probabilidades asociadas a cada variable relevante (Guerrero, 2019).

Vale la pena mencionar que algunos de los enfoques utilizados para abordar el riesgo y la incertidumbre en proyectos de energía geotérmica incluyen, según los hallazgos expuestos en la investigación de Martínez et al., (2021): el análisis de sensibilidad, el análisis de Monte Carlo, los modelos de evaluación de riesgos, y el uso de opciones reales. Estas herramientas permiten explorar diferentes combinaciones de variables y escenarios, brindando una base para la toma de decisiones informada y la mitigación de riesgos.

Además, es importante tener en cuenta que el riesgo y la incertidumbre pueden variar a lo largo de las diferentes etapas del proyecto. Desde la exploración y caracterización del yacimiento, pasando por la etapa de diseño y construcción, hasta la operación y mantenimiento a largo plazo, los riesgos y las incertidumbres pueden evolucionar y requerir estrategias específicas de gestión en cada etapa.

En consecuencia, la volatilidad de los precios de las energías y el incremento de la demanda a nivel mundial juegan un papel determinante en la valoración financiera de las plantas de generación térmica, por lo que, aspectos como la incertidumbre corresponden un valor para la determinación de la toma de decisiones en torno a la inversión de proyectos relacionados a la energía geotérmica, aspecto que en el artículo de Arango et al (2013) donde se plantea que el desconocimiento del valor económico futuro de los proyectos de generación energética incentiva

el estudio sobre las variables que determinan sus resultados, proporcionando a los inversionistas indicios sobre las alternativas que pueden aprovechar, en diferentes escenarios.

2.5.2 Método de Análisis de Incertidumbre (De Sensibilidad)

El AS de escenarios se basa en comparar los efectos que se producen en el resultado final cuando se fijan los peores (peor escenario posible: los costes más elevados y los peores resultados en salud esperables) y los mejores valores (mejor escenario posible: los costes más bajos y los mejores resultados en salud esperables) de varios parámetros simultáneamente.

El análisis de sensibilidad se evalúa como la sensibilidad de los resultados del modelo frente a los cambios de sus parámetros, estado de las variables o datos de entrada. En el caso en que los parámetros muestren insensibilidad pueden ser examinados o de lo contrario eliminados para reducir la carga computacional durante los pasos de optimización o muestreo. (Rincón, 2010, p. 89)

Este tipo de análisis se realiza con regularidad, a pesar de sus limitaciones, que surgen de la subestimación de la incertidumbre global en comparación con los estándares establecidos por la Coste Efectividad Incremental (CEI), debido a la presencia común de alguna correlación en la variación de los parámetros incorporados en los modelos. Además, es importante tener en cuenta que la variabilidad de la CEI suele ser más amplia que la variabilidad independiente de los costos y los efectos. El Análisis Sensible Univariante implica la modificación exclusiva del valor de un parámetro y la observación de su impacto en los resultados del análisis. En un estudio de costo-efectividad, se examina cómo varía el índice de costo-efectividad incremental (CEI), definido como la relación entre la diferencia en costos entre las alternativas evaluadas y la diferencia en efectividad (DC/DE), para distintos valores que el parámetro evaluado pueda adoptar. (Ferriols & Alós, 2011)

2.5.3 Método de Análisis de Incertidumbre (Estimación de Intervalos de Confianza del Coste-Efectividad Incremental)

El problema principal de los estudios de coste-efectividad está en interpretar las ratios en el contexto de la toma de decisiones sobre asignación de recursos. Es decir, la dificultad radica en decidir cuándo “merece la pena” aplicar una tecnología sanitaria nueva –en el sentido de no haber sido puesta en práctica antes– a la vista de su ratio incremental coste-efectividad. Esto es particularmente evidente en el caso –en general no recomendable– de utilizar como medida de los beneficios unidades de valoración de los resultados intermedios.(Prades & Martínez, 2015, p. 31)

Este enfoque implica la ejecución de un análisis de sensibilidad univariante, donde se modifica uno solo de los parámetros en cada iteración, típicamente utilizando valores extremos o diferentes valores dentro de un rango considerado razonable. Para cada valor del parámetro alterado, se recalcula el CEI y se registra el resultado correspondiente. Este procedimiento se repite para varios valores del parámetro de interés. El Método de Análisis de Incertidumbre se aplica con el propósito de establecer intervalos de confianza en el cálculo del Coste-Efectividad Incremental (CEI) en investigaciones relacionadas con la economía de la salud y la toma de decisiones en diversas áreas. Su relevancia radica en su capacidad para evaluar la incertidumbre asociada a las estimaciones del CEI, un elemento crítico en la toma de decisiones fundamentadas. En este tipo de evaluación económica se comparan los efectos sobre la variable y sobre los recursos de dos o más opciones (Ortega, 2011).

2.5.4 Método de Análisis de Incertidumbre (Caja de Confianza)

La indicación de la incertidumbre de la medición refuerza la confianza en los resultados de las mediciones y permite la comparación de diferentes mediciones. Se trata de un requisito básico en el intercambio nacional e internacional de mercancías.(Testo, 2016, p. 1)

Este enfoque determina los intervalos de confianza del Coste-Efectividad Incremental (CEI) al calcular los intervalos de confianza del 95% (IC95 %) de manera independiente tanto para el costo como para la efectividad. El extremo inferior del IC95 % del CEI se establece como el límite inferior del IC95 % de los costos dividido por el límite superior del IC95 % de los efectos. Mientras que el extremo superior del IC95 % del CEI se define como el límite superior del IC95 % de los costos dividido por el límite inferior del IC95 % de los efectos.(Ferriols & Alós, 2011)

2.5.5 Método de Análisis de Incertidumbre (Fieller)

El método Fieller es una herramienta estadística ampliamente empleada en análisis de datos para determinar intervalos de confianza relacionados con la proporción de dos variables aleatorias. Su uso es común en diversos campos, como estadísticas, economía, biología, ingeniería y estudios de mercado, siempre que se necesite estimar la relación entre dos variables y se requiera establecer un rango de confianza para esta asociación.(Knolle, 1998)

Este método se aplica en escenarios donde existen dos variables, denominadas X e Y, y se busca calcular un intervalo de confianza para la razón X/Y o cualquier otro parámetro vinculado a esta proporción. Por lo que, se apoya en conceptos de probabilidad y técnicas de estadística inferencial para estimar la relación entre ambas variables y generar un intervalo de confianza que refleje la incertidumbre asociada a esta relación. La elección de fórmulas y enfoques específicos depende de la naturaleza de los datos y las suposiciones subyacentes al análisis. La principal limitación de este método se produce cuando la efectividad incremental no es significativamente distinta de cero, produciendo intervalos infinitos.(Ferriols & Alós, 2011)

2.5.6 Método Montecarlo

De manera similar, Taha (2012) define la simulación Montecarlo como “un esquema de modelado que estima parámetros estocásticos o determinísticos con base en un muestreo aleatorio”

(p.647). Por su parte, Hidalgo & Assis (2011), explican que el método de Monte Carlo es una herramienta que permite determinar la función de distribución de frecuencia de una variable dependiente, utilizando números aleatorios uniformes que representan las variables independientes involucradas.

Este método se basa en la premisa de que la variable dependiente estudiada tiene una función $Y=f(X_1, X_2...X_n)$, y que las distribuciones de probabilidad de las variables X_1, X_n son conocidas. Se asignan valores de frecuencia a valores aleatorios de las variables $X_1, X_2...X_n$, y se evalúa la función Y para esos valores. Este proceso se repite iterativamente hasta lograr la convergencia de la distribución de probabilidad.

Cuando se genera un valor aleatorio $R_u(0, 1)$, el valor de $x=r$ que satisface $F(r) = R_u(0, 1)$ se convierte en un valor aleatorio de la función de distribución de probabilidad $f(x)$ dentro de $F(r)$. El objetivo principal de la técnica de Monte Carlo es aproximarse a la función de probabilidad de una o más variables aleatorias. Para llevar a cabo la simulación de Monte Carlo, se requiere una gran capacidad de cálculo para generar una amplia gama de números.

Así mismo, Cárdenas et al. (2022) indica que el método de Monte Carlo se utilizó por primera vez durante la II Guerra Mundial como una herramienta de investigación en el desarrollo de la bomba atómica. Estas revelaciones también se abordan, entre otras obras, dentro de las investigaciones de Veliz (2017).

Dentro de estos aportes se realizaron simulaciones directas de problemas probabilísticos para estudiar la difusión aleatoria de neutrones en material inestable. Por otro lado, Villadiego et al (2021) explica que el método de Monte Carlo es una técnica que permite resolver problemas matemáticos a través de la simulación de variables aleatorias. Con lo cual, este método se relaciona con el casino de Monte Carlo ubicado en Mónaco, que poseía ruletas consideradas como

generadoras de números aleatorios. Al construir un modelo que deba ser simulado mediante el método de Monte Carlo, se establecen entradas de datos que se ajustan a una distribución de probabilidad a partir de datos históricos, para luego analizar los resultados obtenidos.

2.5.7 Control del Riesgo

La norma ISO 31000 brinda a las organizaciones elementos de apoyo para la gestión de riesgos. Esta norma expone las directrices para que el proceso de gestión pueda ser definido de acuerdo con las necesidades particulares de la organización que lo aplica. Esto se logra realizando la identificación de riesgos mediante una metodología sistemática que facilita el análisis, la evaluación y posteriormente la definición de estrategias para dar respuesta a los riesgos. De esta manera, el posible impacto puede tornarse positivo o evitar que no genere pérdidas significativas para la organización, la norma ISO 31000 está estructurada en tres elementos claves para llevar a cabo una gestión de riesgo efectiva, transparente, sistemática y creíble, dichos elementos son:

- A. Principios de la Gestión del Riesgo
- B. Marco de trabajo para la Gestión de Riesgos
- C. Proceso de Gestión de Riesgos.

Esta norma establece varios principios que se deben cumplir para hacer que la gestión sea eficaz, adicionalmente la norma recomienda que las organizaciones desarrollen, implementen y mejoren un marco de referencia o marco de trabajo, cuyo propósito sea integrar el proceso.

En ese orden, se puede advertir que la gestión de los riesgos en el contexto de proyectos de energía geotérmica se refiere a un enfoque integral para identificar, evaluar, mitigar y controlar los riesgos asociados con la ejecución de un proyecto. Por lo tanto, esta labor de gestión implica una serie de parámetros y restricciones que tienen que ver con elementos como: la aplicación de

Diseño de un modelo probabilístico para apoyar el estudio de incertidumbre y riesgo asociado a la ejecución del proyecto de Geotermia en Nereidas como ERNC en la región para CHEC S.A. E.S.P. BIC

metodologías y herramientas adecuadas para comprender, cuantificar y gestionar los posibles eventos adversos que podrían afectar el desarrollo exitoso del proyecto. (Sequeira, 2021).

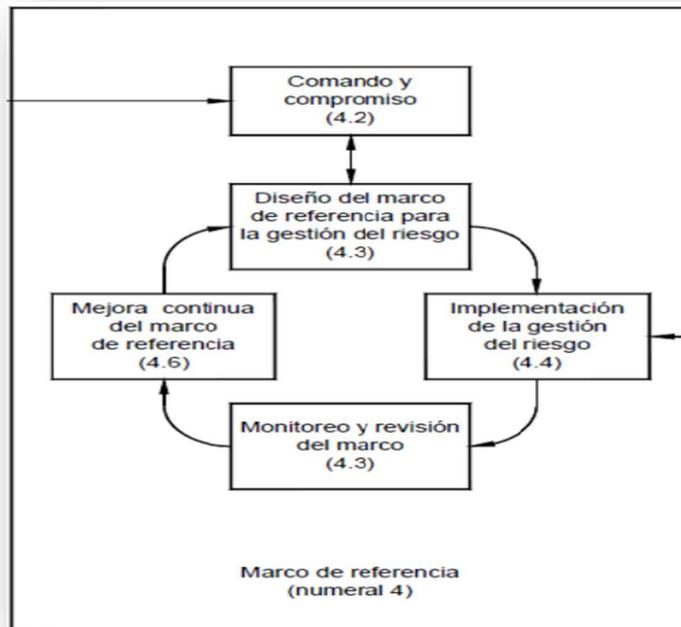


Figura 7. Estructura de la Norma ISO 31000. Nota. Tomado de Fuente (NTC, 2009)

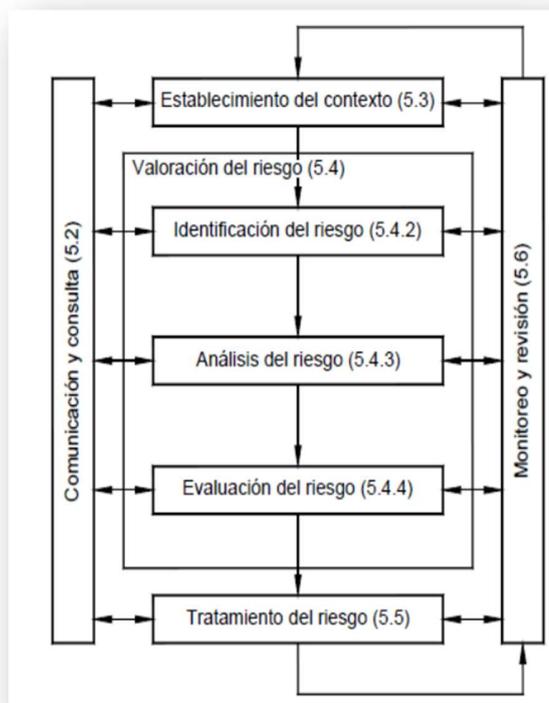


Figura 8. *Proceso Gestión de Riesgos.* Fuente: Nota. Tomado de Fuente (NTC, 2009)

De ese modo, según los análisis de Sequeira, este abarca diferentes etapas, desde la planificación inicial hasta la operación a largo plazo. No obstante, en su análisis, el autor también expone que, para lograr una gestión efectiva, es esencial seguir un enfoque sistemático que permita identificar y abordar los riesgos en cada fase del proyecto, como bien se ha especificado anteriormente.

En la etapa de planificación, se deben evaluar los riesgos potenciales que podrían surgir debido a la incertidumbre geológica, los aspectos técnicos y económicos, y las condiciones del mercado. Esto implica analizar factores como la disponibilidad y calidad del recurso geotérmico, la viabilidad técnica de la tecnología geotérmica, los costos asociados con la perforación y el desarrollo del pozo, y los aspectos regulatorios y legales (Villadiego et al., 2021).

Posteriormente, y de acuerdo con la información que se expone en los análisis de Guerrero (2019) durante la fase de diseño y construcción, la gestión de riesgos implica identificar y mitigar los posibles desafíos que podrían surgir, como la estabilidad del pozo, la selección de materiales adecuados, la gestión del agua y los impactos ambientales. Es importante utilizar herramientas de evaluación de riesgos, como análisis de fallas, análisis de causa raíz y análisis de seguridad, para identificar las vulnerabilidades y aplicar medidas de mitigación apropiadas.

No obstante, vale la pena mencionar que, para los proyectos asociados con la evaluación de la viabilidad financiera de proyectos de energía geotérmica, es especialmente importante revisar aspectos como: los antecedentes de modelos, proyectos o ejecuciones de proyectos de energía geotérmica similares. En ese sentido, las investigaciones resaltadas en esta sección destacan precisamente estos elementos de naturaleza cuantitativa en donde es posible hacer una evaluación general del apartado de riesgos e incertidumbre específicos, por lo que se considera un material importante para el desarrollo de los objetivos que se ha propuesto el proyecto. (Guerrero, 2019).

Por último, y de acuerdo con el análisis de Guerrero (2019) y Martínez et al., (2021), las estrategias basadas en la probabilidad desempeñan un papel crucial en la gestión de riesgos en proyectos de energía geotérmica. Así mismo, se resalta el papel primordial de elementos aplicables en este campo como el análisis de Monte Carlo, que permite evaluar múltiples escenarios posibles y estimar la probabilidad de ocurrencia de cada uno de ellos.

3 Bases Determinísticas Proyecto Geotérmico Valle Nereidas

Teniendo en cuenta las bases teóricas analizadas y entendiendo que nos encontramos ante un escenario donde la incertidumbre, es preponderante en todas las etapas del proyecto, desde la planeación técnica, la construcción del proyecto y hasta la operación de la misma, y necesariamente también encontramos incertidumbre en lo que se refiere al mercado interno, los escenarios macroeconómicos, se hacen necesario entender lo preponderante a la hora de validar el proyecto geotérmico.

3.1 Variables para la factibilidad del Proyecto Nereidas

3.1.1 Variables preliminares proyecto Geotérmico

El proceso de clasificación de variables es esencial para la validación de proyectos geotérmicos en el campo del Valle de Nereidas. En este sentido, se requiere llevar a cabo una exhaustiva revisión bibliográfica que aborde las preferencias y enfoques de diversos referentes en el ámbito de la formulación y evaluación de proyectos. El siguiente cuadro resume una sugerencia preliminar en este sentido:

Tabla 4. Variables recomendadas literatura

Variables determinísticas para proyectos	Autor
Estudios de mercado, técnicos, económicos y financieros.	Bolívar, H. (2001).
Proponen cuatro (4) variables de evaluación: viabilidad técnica, económica, medioambiental y social.	González, L. & Vidaud, I. (2009).
Estudios de mercado, técnicos, aspectos ambientales, restricciones legales y proyección económico-financiero.	Vivallo, P. (2017).
Estudios de mercado, técnicos, administrativos, ambientales, financieros y económicos.	Carmona, C. et. al. (2010).
Estudios técnicos, de mercado, organizacional-administrativo-legal, financiero e impacto ambiental. Además, propone unos variables sociales, éticos, viales y emocionales.	Sapag, N. & Sapag, R. (2008).

Nota. Elaborado por el investigador a través de la recopilación de autores.

En la exploración del componente esencial en proyectos geotérmicos, Wolf & Gabbay (2015) llevaron a cabo un minucioso análisis de un proyecto de 300 MW en el distrito de Tapanuli Utara, al norte de Indonesia. Su investigación desglosó los desafíos y riesgos que los desarrolladores enfrentaron en su búsqueda del éxito. Como resultado, propusieron una evaluación exhaustiva de variables técnicas, legales y financieras para validar los elementos críticos en el desarrollo geotérmico.

En contraste, Adhikary et al. (2015) sugirieron considerar factores sociopolíticos, tecnológicos, ambientales y económicos. Su enfoque, basado en la optimización multicriterio para la evaluación de proyectos de energía renovable, se considera innovador, especialmente en vista de las limitadas referencias bibliográficas en este ámbito.

Las percepciones de varios autores especializados en proyectos y energía renovable reflejan similitudes, particularmente en las variables técnicas (o tecnológicas, según Adhikary et al., 2015) y en el ámbito económico-financiero. En este último, las exposiciones de los autores revelan una división al evaluar estos elementos de manera independiente o conjunta. No obstante, se destaca una sutil diferencia entre ambos, donde la evaluación financiera posibilita proyectar costos, ingresos y egresos para calcular indicadores de rentabilidad y sostenibilidad, mientras que la evaluación económica aborda integralmente la inversión, considerando el impacto positivo en las partes interesadas.

Finalmente, en el estudio se cuentan con variables adicionales a tener en cuenta en donde los autores de manera sincrónica están de acuerdo, la variable ambiental es propuesto por cinco (5) de los siete (7) autores consultados, en donde la geotermia independiente de ser una energía renovable consideran oportuno evaluar otros impactos asociados al proceso constructivo para tomar decisiones acertadas (Kristmannsdóttir & Ármannsson, 2003); la variable jurídica o legal,

se caracteriza por ser de gran importancia en los proyectos geotérmicos, entendiendo que las políticas gubernamentales pueden iniciar, promover, interrumpir o desacelerar la ejecución de proyectos de energía renovable afectando otras variables que pueden inviabilizar un proyecto.

Finalmente, aunque no de manera predominante, algunos autores destacan la importancia del estudio de variables sociales en proyectos geotérmicos. Comprenden que estos proyectos, al situarse en áreas remotas con fuertes tradiciones culturales, a menudo entran en conflicto con las comunidades locales y requieren un proceso integral de socialización. Este proceso debe involucrar a ambas partes, desarrolladores y comunidades, para viabilizar un desarrollo positivo del proyecto que beneficie a ambas partes.

Para el presente estudio, se considerarán las variables técnicas, económico/financieras, ambientales, político/legales y socioculturales. Estas se ordenan de acuerdo con su nivel de aceptación en la literatura de evaluación de proyectos y energía geotérmica, de mayor a menor. A continuación, se resumen cada una de estas variables, describiendo su concepto, alcance e importancia en el modelo determinístico para el proyecto geotérmico Valle de Nereidas. Estos aspectos se abordarán tomando como referencia desarrollos previos en ejercicios anteriores realizados en CHEC S.A. E.S.P. (Tamayo, 2020).

3.1.2 Variables técnicas

Se lleva a cabo la revisión exhaustiva de los aspectos técnicos y operativos, con el objetivo de aprovechar de manera óptima los recursos en la transición hacia la generación de energía. En este proceso, se detallan los materiales, opciones tecnológicas y personal necesarios (Vivallo, 2017). Estas variables adquieren una importancia crucial en los proyectos, dado que a través del análisis de diseños conceptual, secundario y detallado se revelan los requisitos necesarios para dar funcionalidad a la generación de energía eléctrica a partir de fuentes geotérmicas. En este contexto,

es esencial determinar la potencia y la tecnología recomendable de la planta, teniendo en cuenta las características y el potencial del recurso geotérmico, así como los niveles de eficiencia deseados. Esto permite diseñar de manera adecuada el sistema más conveniente (Carmona et al., 2010).

En el ámbito de la geotermia, la variable principal que define la viabilidad del recurso es la calidad del mismo. Esta calidad está influida en gran medida por factores geológicos, geofísicos y geoquímicos, como la temperatura, el gradiente térmico, la entalpía, la estructura del reservorio, la altura sobre el nivel del mar, la ubicación geográfica y las condiciones climáticas. Aunque muchas de estas variables técnicas han sido abordadas a lo largo del documento, en esta sección se realizará una recopilación y se les asignará una calificación en una escala del 0 al 10. Esta calificación permitirá valorar las condiciones ingenieriles óptimas del proyecto de energía geotérmica.

Así las cosas, se enlistan las variables técnicas y la forma de calificarlas dentro del proyecto.

1. **Calidad del recurso:** El recurso geotérmico puede ser líquido, vapor o mezcla. Identificar este aspecto resulta siendo uno de los factores más relevantes para el proyecto. Se resalta que el recurso será de mayor calidad en la medida en que sea preponderantemente vapor seco.
2. **Temperatura del recurso:** el recurso ya sea líquido, vapor o mezcla puede encontrarse a diferentes temperaturas, las más altas garantizan condiciones óptimas para el proyecto
3. **Selección de planta:** tal y como se identificó en apartes anteriores, existen diferentes tipos de plantas, la definición de la planta a utilizar dependerá de calidad del recurso, no obstante, para efectos de calificarlas se preferirán aquellas que ofrezcan más eficiencia y sostenibilidad.

4. **Eficiencia de los sistemas adicionales de generación:** Además de la planta principal, se prefiere la existencia de unidades adicionales que permitan aumentar la generación de energía, para calificarlas igual que la planta principal se seleccionarán aquellas que ofrezcan más eficiencia y sostenibilidad.

5. **Línea de distribución de energía:** este factor técnico refiere a la disponibilidad del punto de evacuación de energía más cercano a la planta de generación, entre más cercano mejor calificación obtendrá este factor.

En el siguiente cuadro, se establece con más nivel de detalle cada factor técnico, la evaluación asignada de 0 a 10 y una descripción explicativa.

Tabla 5. Subfactores de la variable técnica

Variable	Subfactores	Escalas de evaluación (0 a 10)	Descripción
Variables técnicas	Calidad del recurso del yacimiento	Líquido saturado (2) Líquido dominantes (4) Mezcla (6) Vapor dominantes (8) Vapor seco (10)	0. 0. Evalúa la calidad del recurso jerarquizando aquellas con mayor porcentaje de vapor (al lado derecho se tienen las proporciones para cada escala cualitativa)
	Temperatura del recurso	T < 100°C (2) 100°C < T < 150°C (4) 150°C < T < 200°C (6) 200°C < T < 300°C (8) T > 300°C (10)	La escala de evaluación se basa en rangos de temperaturas dando importancia a las más altas, si un campo se encuentra en dos escalas se debe evaluar con la más baja
	Selección de planta de geotermia de la unidad de máxima capacidad	Contrapresión (2) Flash simple (4) Flash Doble y triple (6) Binaria (8) Vapor seco (10)	La escala indica las posibles tecnologías que puede adoptar un proyecto geotermico en su principal unidad, favoreciendo aquellas más sostenibles y eficientes
	Eficiencia de los sistemas adicionales de generación	Una o varias modulares a contrapresión (2) Modulares flash simple (4) Modulares binarias (6) Ciclos combinados (8) Combinación ciclo combinado y modulares (10)	Evalúa los sistemas de generación adicionales a las unidades principales, favoreciendo aquellas con mayor sostenibilidad y eficiencia
	Línea de Dsitribución de energía. Desarrollo de infraestructura - distancia a centros poblados > 15.000 habitantes	d > 50 km (2) 30 km < d < 50 km (4) 15 km < d < 30 km (6) 5 km < d < 15 km (8) d < 5 km (10)	Evalúa la cercanía a redes de transmisión, dsitribución o subetsaicones, vías y demás infraestructura típica de poblaciones con más de 15.000 habitantes, traduciendo en menores costos.

Fuente: Datos CHEC.

Encontrar las condiciones perfectas para un proyecto es poco probable, pero para efectos académicos y explicativos el proyecto con las mejores condiciones técnicas será aquel que cuente

Diseño de un modelo probabilístico para apoyar el estudio de incertidumbre y riesgo asociado a la ejecución del proyecto de Geotermia en Nereidas como ERNC en la región para CHEC S.A. E.S.P. BIC

con: (i) vapor seco, (ii) a una temperatura mayor a 300 °C, (iii) con una planta vapor seco y (iv) una combinación de ciclo combinado y modulares como sistema adicional de generación y (v) a una distancia de menos de 5 km de la subestación eléctrica más cercana.

No obstante, en geotermia sólo se tendrá certeza de las características técnicas de calidad y temperatura una vez se haya explorado y perforado, situación que representa un riesgo relevante para el inversionista frente a otro de tipo de proyectos que no presentan esta situación. Para brindar más claridad al respecto se hace el siguiente comparativo entre las condiciones técnicas de otro tipo de proyectos de generación de energía vs geotermia.

1. Planta Hidroeléctrica: los requerimientos técnicos mínimos para determinar la capacidad de generación de energía de un proyecto de esta naturaleza incluyen: caudal, gravedad, altura y tipo de turbina. **Todos estos aspectos se evidencian desde el primer momento del proyecto.**

2. Planta solar: los requerimientos técnicos mínimos para determinar la capacidad de generación de energía de un proyecto de esta naturaleza incluyen, tener certeza sobre el espacio disponible para la instalación, con ello podrá definirse la cantidad de paneles y la producción que cada uno de ellos pueda generar en vatios pico (Wp), así como el nivel de irradiancia de la zona geográfica establecida. **Todos estos aspectos se evidencian desde el primer momento del proyecto.**

3. Geotermia: los requerimientos técnicos mínimos para determinar la capacidad de generación de energía de un proyecto de esta naturaleza incluyen calidad del recurso y temperatura.

Ninguno de ellos conocidos hasta la exploración y perforación inicial

Ahora bien, se resalta una ventaja única de la geotermia que la diferencia de proyectos hidroeléctricos, solares y eólicos: **la firmeza de energía.** Para explicar lo anterior, se precisa que

en geotermia una vez identificados los requisitos mínimos, se obtiene un nivel de firmeza elevado toda vez que la temperatura del reservorio es continúa e infinita; lo que no ocurre con las demás fuentes de generación de energía renovables, pues, aunque conocen su nivel de capacidad, su firmeza dependerá de factores climatológicos, atmosféricos y meteorológicos.

Finalmente para los otros subfactores técnicos, conviene señalar que una vez identificados los requisitos mínimos técnicos para la geotermia, se identificarán los proveedores de equipos tanto en planta de energía como exploración, capacidad de las plantas geotérmicas, redes de tuberías de vapor RGS y de distribución de energía, total de pozos de producción y total de pozos para reinyección, las características del recurso en las diferentes fases de la generación de electricidad, entre otros elementos para la construcción de los campos; con toda esta información se soportan las decisiones tomadas en cada una de las fases y se determinaran las relaciones entre los diferentes componentes del proyecto (Sapag, N. & Sapag, R., 2008).

Variables técnicas Proyecto Nereidas.

El sector occidental del Nevado del Ruiz, que abarca Valle de Nereidas, El Recodo y Chorro Negro, ha sido identificado como una región significativa para la exploración geotérmica en Colombia (Hincapié, 2013). La zona de estudio exhibe dos sistemas de fallas (López, 2017). Además, esta cordillera alberga otros centros volcánicos importantes, como Cerro Bravo, Santo Domingo, Santa Rosa de Cabal, El Bosque, Nevado del Tolima y Cerro Machín, con más de 100 manifestaciones termales asociadas (representando el 33% de las conocidas en Colombia) (Bona & Coviello, 2016).

En particular, Valle de Nereidas y Río Claro son áreas de gran interés para la empresa, ubicadas a altitudes que oscilan entre 2500 metros y 3600 metros sobre el nivel del mar, en las proximidades de la línea de nevados. Aunque esta región es remota, escasamente poblada y posee

una topografía variada, presenta desafíos de accesibilidad vial que podrían ser mitigados mediante la implementación de una estructura de mantenimiento adicional en la vía existente de 48.21 km y la creación de nuevos trazados de 3.5 a 5 km. Se planea la construcción de 5 plataformas de exploración y perforación, cada una con áreas inferiores a 1.28 hectáreas, tres de ellas (N2, N3, N4) ubicadas en Nereidas y dos en Río Claro, junto con la construcción cercana de 10 zonas de disposición de material sobrante (ZODME) para reducir los tiempos de desplazamiento.

Se proyecta llevar a cabo actividades de perforación y pruebas de producción para validar las condiciones del recurso. En caso de obtener resultados óptimos, se procederá con la construcción de la infraestructura geotérmica más viable. Sin embargo, si se identifican deficiencias en el recurso o se encuentran excesos económicos en las perforaciones, se llevará a cabo el desmantelamiento y la restauración de los pozos no utilizados. Aún no se ha definido si se instalará una central geotérmica de aproximadamente 65 MW o 25 MW, escalable en el tiempo, o plantas boca de pozo con capacidades cercanas a 5 MW - 7 MW. En la tabla 5. correspondiente, se resumen las principales características del campo Valle de Nereidas.

Tabla 6. *Características. Propiedades del campo y el recurso geotérmico Valle Nereidas.*

Característica	Medición
Área del campo geotérmico	54 km ² (López, 2017)
Temperatura del reservorio	250-260°C (Alfaro, 2005)
Gradiente térmico	130°/km (López, 2017)
Altura sobre el mar de la zona de recarga	4500 m.s.n.m. (López, 2017)
Altura del campo geotérmico	2500-3600 m.s.n.m. (López, 2017)
Conductividad de las rocas	12 ohmios (López, 2017)
Característica de la roca	Alta impermeabilidad
Grosor capa sello	500-1000m (López, 2017)
Número de manifestaciones termales	100 unidades (Bona & Coviello, 2016)
Temperatura/profundidad Nereidas 1	200 °C/1.466 m (Monsalve et al., 1998)
Número de fallas geológicas	2 (López, 2017)

Nota. Elaborado por el investigador mediante información recolectada.

3.1.3 *Variables económicas/financieros:*

La proyección de las inversiones necesarias para la construcción y puesta en marcha del proyecto geotérmico se establece de acuerdo con los parámetros técnicos previamente determinados. Posteriormente, se detallan los costos de construcción, administración, operación y mantenimiento durante los años de funcionamiento, utilizando estándares internacionales como referencia. Finalmente, se proyectan los ingresos generados a través de los mercados de energía, así como el capital de trabajo necesario para el funcionamiento continuo del proyecto.

Esta evaluación económica básica tiene como objetivo determinar las necesidades de financiamiento y fuentes de ingresos, basándose en indicadores y cifras que permitan anticipar un panorama favorable. Se busca específicamente lograr un retorno superior al costo del capital invertido por parte de los interesados, siguiendo la metodología propuesta por Vivallo (2017) y Sapag, N. & Sapag, R. (2008).

Es crucial destacar que los proyectos geotérmicos se caracterizan por requerir inversiones considerables en comparación con otros proyectos de generación de energía, y también presentan mayores riesgos en las fases iniciales. Por esta razón, autores como Wirawan et al. (2020) y Huang et al. (2019) enfatizan la importancia de los aspectos económicos y financieros en las evaluaciones para mitigar los riesgos inherentes. Estos estudios se centran particularmente en los niveles de retorno de la inversión (ROI) y la tasa interna de retorno (TIR), elaborando proyecciones detalladas de costos en las fases de diseño, construcción y control ambiental, abarcando desde el proceso de exploración del campo hasta la adquisición de la zona de interés.

Con lo que, el desarrollo de la construcción de las instalaciones y la operación de la planta; posteriormente estiman los ingresos por venta de energía eléctrica, energía térmica para otros usos e incluso extracción de minerales, estableciendo precios fijos o variables acordes a los beneficios

otorgados por la ley vigente, y egresos de los procesos de operación, administración y mantenimiento de las instalaciones, dado que este tipo de proyectos plantean una vida útil superior a los 30 años, se deben suplir elementos de reposición. Todas estas estimaciones se deben realizar con rigor y formalidad para así dar factibilidad y viabilidad económicamente al proyecto generando mayor confianza en los inversores (Sapag, N. & Sapag, R., 2008).

Adicionalmente con periodicidad se realizan análisis de sensibilidad, para verificar varianzas que permiten realizar cambios de ciertas variables claves como el precio de compra del kWh, costos de operación y mantenimiento, escenario macroeconómico, total de pozos, tasas de interés bancarias o de inversión, exenciones tributarias, tiempos de construcción, entre otros, que causan cambios significativos en los indicadores económicos más usados como el VPN valor presente neto, la TIR tasa interna de retorno, PRI periodo de recuperación de capital, relación costo/beneficio, inversión por empleo, costos unitarios, el costo de oportunidad, etc. (Bloomquist, 2006; Bob, 1998; Carmona C.A. et. al., 2010).

Finalmente, es importante realizar la evaluación económica de forma integral, incluyendo la información de otros estudios realizados como el técnico, ambiental, legal y social con el fin de analizar la viabilidad, conveniencia y oportunidad de la inversión, garantizando el desarrollo económico y social de las partes interesadas, así se agrega valor al proyecto convenciendo con mayor facilidad a inversores e instituciones financieras. Además, se pueden identificar variables críticas que requieran seguimiento, para el cumplimiento de las metas trazadas por la empresa acorde a los recursos disponibles y demás estudios realizados para el proyecto (Carmona C.A. et. al., 2010).

Entrando en materia, para el proyecto analizado se identifican dos subfactores de la variable económica, los cuales se explicarán y se le asignará un puntaje de 0 a 10, que permitan identificar las mejores condiciones del proyecto, tal como se realizó con las variables técnicas.

1. CAPEX: Refiere a las inversiones requeridas para poner en operación un proyecto de energía geotérmica. Estas inversiones serán calculadas en millones de dólares (MDD) por MW.
2. LCOE: costo nivelado de la energía que está expresado en dólares (USD) por kWh.

Normalmente todos los proyectos incluyen en sus análisis financieros la tasa interna de retorno TIR y el valor presente neto VPN. No obstante, como aún no se ha identificado la capacidad de generación en MW, ni la capacidad de generación de energía (MWh), porque aún no se han realizado labores de perforación y exploración, que a su vez permitirían identificar la calidad del recurso: vapor, líquido o mezcla; para este proyecto no es posible aún contar con estos indicadores.

Como consecuencia de esto, por el momento se utilizará el indicador LCOE (Levelized Cost of Energy) que permite evidenciar el precio de mercado energético que requiere el proyecto geotérmico para igualar sus costos e inversiones y el CAPEX (capital expenditure) entendiendo que las inversiones de capital de todos los activos fijos requeridos en proyectos geotérmicos son el foco de las fuentes de financiación para el cierre financiero.

A continuación, las valoraciones determinísticas para los subfactores tenidos en cuenta:

Diseño de un modelo probabilístico para apoyar el estudio de incertidumbre y riesgo asociado a la ejecución del proyecto de Geotermia en Nereidas como ERNC en la región para CHEC S.A. E.S.P. BIC

Tabla 7 *Subfactores variable económica / financiera*

Variable	Subfactores	Escalas de evaluación (0 a 10)	Descripción
Variable económico/ financiero	CAPEX - (MDD / MW)	\$ > 6 (2) 4.9 < \$ < 6 (4) 3.9 < \$ < 4.9 (6) 2.8 < \$ < 3.9 (8) \$ < 2.8 (10)	Evalúa la inversión inicial de la infraestructura geotérmica por MW, si un campo se encuentra en dos escalas se debe evaluar con la más baja.
	LCOE (USD/ kWh)	\$ > 0.13 (2) 0.1 < \$ < 0.13 (4) 0.8 < \$ < 0.1 (6) 0.05 < \$ < 0.08 (8) \$ < 0.05 (10)	Evalúa la inversión inicial (CAPEX) y los costos de operación (OPEX), proyectando un costo unificado por kW durante todo su tiempo de funcionamiento.

Nota. Tomado de datos CHEC.

Así las cosas, para efectos académicos el proyecto más viable económicamente hablando será aquel que este valorado en menos millones de dólares por MW y cuyo LCOE sea inferior.

Variables económicas Proyecto Nereidas.

La inversión total del proyecto ha sido ajustada para contemplar posibles variaciones técnicas, tales como el número total de pozos exploratorios, la profundidad de cada perforación, la decisión de instalar una única planta de generación o pequeñas plantas geotérmicas de manera escalable, la ubicación geográfica de las instalaciones, y otras variables relevantes. En la tabla 9, se presentan los costos estimados en la fase de exploración y construcción del proyecto Valle de Nereidas. Dada la confidencialidad del proyecto, se proporciona un resumen en conceptos básicos, discriminando los diversos componentes de inversión de capital (CAPEX) que deben ser desarrollados:

Tabla 8. Capex estándar proyectos Geotérmicos

CAPEX (capital expenditure)	Valor USD teórico
Desarrollo - Costos indirectos del Propietario (unidad/pozo)	USD 11.000.000
Perforación (unidad/pozo)	USD 10.000.000
Recursos y Sistema de Recolección (RGS) (USD/kW)	USD 560

Planta de energía (USD/kW)	USD	1.958
Transmisión (USD/Km de Red 115Kv)	USD	450.000
OE (Owner's Engineering) Ingeniería del Propietario y para contingencias	1%	

Nota. Elaborado por el investigador mediante información recolectada.

Ahora bien, para entender cada rubro se especifica la figura 10 Diagrama de flujo proceso geotérmico, entendiéndolo en CAPEX para interpretación así:

Desarrollo - Costos indirectos del Propietario (unidad/pozo): corresponde a las erogaciones de estudios de ingeniería conceptual, licenciamiento ambiental, permisos de construcción, vías de acceso, exploración y perforaciones de producción e inyección para reconocimiento del yacimiento cuyo principal objetivo de estos pozos es establecer la presencia y características esperadas del reservorio.

Perforaciones (unidad/pozo): capital de inversión que consiste en introducir las sondas de captación a la profundidad adecuada, donde el calor del suelo es más estable, y permita el óptimo funcionamiento del sistema geotérmico. La profundidad de las mismas oscila entre los 800 metros y 3.000 metros, dependiendo de las características del terreno. A través de un proceso de convección natural, el calor se transfiere desde el subsuelo a la superficie, donde se puede utilizar para generar electricidad, típicamente la producción en MW por cada pozo puede variar (Stefansson, 2002)

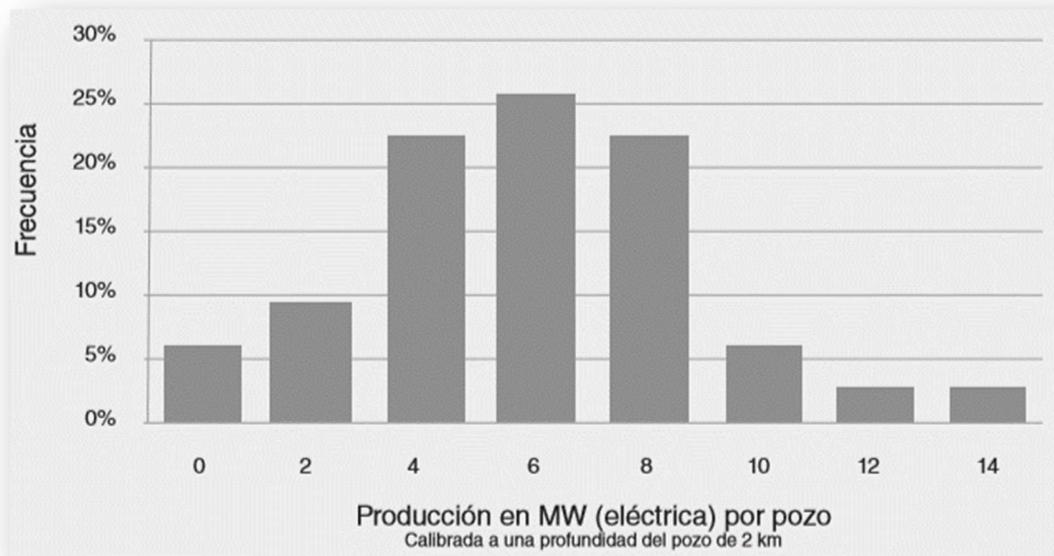


Figura 9. Promedio de MW por pozo .Nota. Informado tomado de Stefansson, 2002

Recursos y Sistema de Recolección (RGS) (USD/kW): capital de inversión que consiste en adquirir todos los vapor ductos requeridos de producción o reinyección desde boca de pozo hasta la turbina principal, incluyendo termo cambiador o intercambiador de calor dependiendo el tipo de planta y la torre de enfriamiento para reinyección final.

Planta de energía (USD/kW): consiste en el capital de inversión de una instalación que recibe el vapor de agua proveniente de los vapor ductos y se liberan y acciona las palas de la turbina, que convierte esa energía térmica (calor) en energía mecánica de rotación, la cual a su vez hace girar el alternador. El alternador o generador de corriente alterna transforma la energía mecánica de rotación en energía eléctrica, que se vierte en la red, a su vez se incluyen las inversiones de la subestación eléctrica elevadora con sus respectivas transformaciones y bahías correspondientes.

Transmisión (USD/Km de Red 115 kV): consiste en el capital de inversión de la red eléctrica de distribución requerida desde la bahía de línea de conexión de la subestación elevadora hasta la bahía de línea de la subestación de energía de evacuación más cercana en el sistema eléctrico. Se asume en este caso, una red en 115 Kv. Posteriormente, es importante mencionar que no se han considerado los costos asociados a la utilización del campo, entendiendo que la exploración y sus resultados son un punto crítico y determinante sin embargo para estudios superiores finales se supone bajo un estándar que el valor por MW construido para el proyecto geotérmico es de US\$ 5 MDD a US\$ 6 MDD.

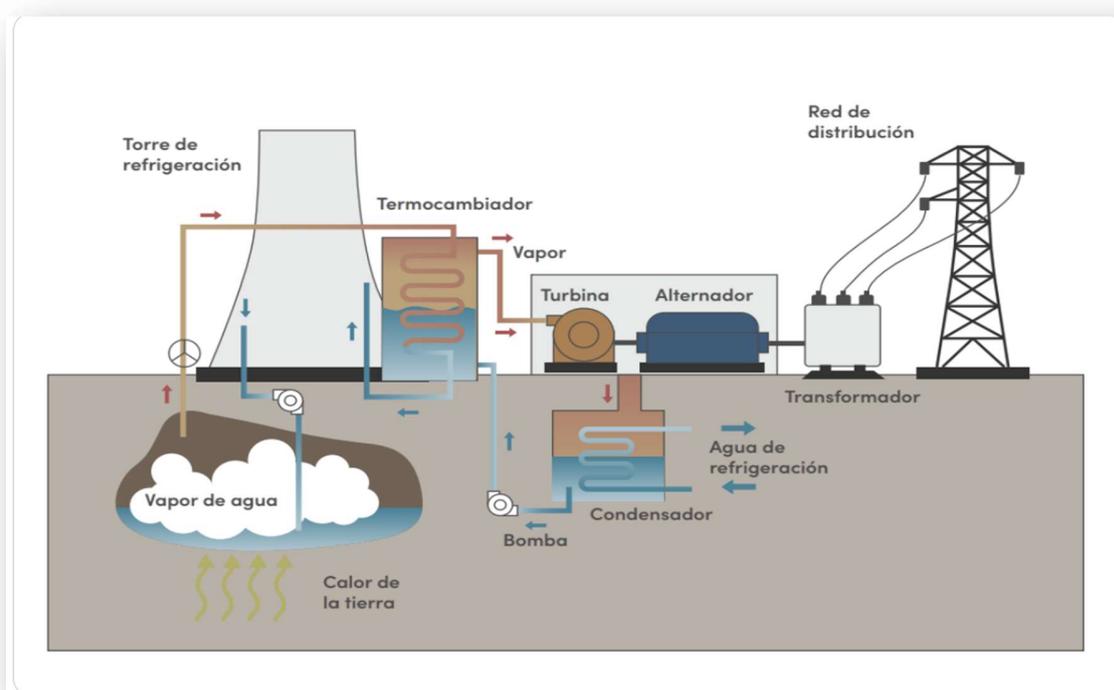


Figura 10. Diagrama de flujo y Equipos CAPEX proceso geotérmico .Nota. Información tomada de la fuente (Carmona et. al, 2010)

3.1.4 Variables políticas/jurídicas:

La factibilidad de un proyecto se establece de acuerdo con las leyes, regulaciones y normas imperativas expedidas por los gobiernos, las cuales pueden condicionar las decisiones en distintos momentos y contextos a lo largo del ciclo del proyecto (Carmona et al., 2010). En el caso de Colombia, el marco jurídico juega un papel crucial, ya que influye directamente en las decisiones durante el desarrollo geotérmico. Los inversores y ejecutores privados del proyecto no tienen la capacidad de modificar este marco jurídico externo, pero deben ajustarse a él. Algunas leyes pueden restringir la ubicación de las plantas de generación, los pozos de producción y reinyección en áreas ambientalmente protegidas, controlar las concesiones para el registro de la exploración y explotación de los campos, imponer restricciones tecnológicas y regular el uso de los recursos, entre otros aspectos que afectan las variables técnicas.

Para participar en la transición energética en Colombia mediante proyectos de geotermia, es esencial contar con decretos que regulen y permitan la ejecución de dichos proyectos. Además, el marco jurídico puede tener un impacto significativo en otras variables estudiadas, como las ambientales, socio-culturales y económico-financieras. En el ámbito económico/financiero, por ejemplo, la legislación a veces otorga ventajas tributarias que benefician las energías renovables, como la compra de energía anticipada, exenciones fiscales, descuentos e incentivos para tecnologías amigables con el medio ambiente. Sin embargo, en algunos países, la falta de promoción o incluso medidas que perjudican a las energías renovables, como fijar precios bajos de energía, subsidiar energías fósiles y no adoptar beneficios para la geotermia, pueden generar impactos económicos negativos que podrían volver inviables los proyectos.

En el factor socio/cultural, algunas naciones también protegen a las comunidades étnicas, y en el factor ambiental se regula la protección, conservación y reparación del medio ambiente

(Sapag, N. & Sapag, R., 2008). Estos aspectos refuerzan la idea de que el marco jurídico no solo influye en lo técnico y financiero, sino que también tiene implicaciones significativas en el ámbito ambiental y social del proyecto geotérmico.

A continuación, se establecerá el cuadro de variables políticas/legales y se calificarán con el fin de asignarles un puntaje que determina la viabilidad jurídica del proyecto.

Tabla 9 . Subfactores variables Políticas / legal

Variable	Subfactores	Escalas de Evaluación (0 a 10)	Descripción
Variable política/legal	Normativas regulaciones subcategorías	y Inexistente (2) En propuesta (4) En borrador (6) En proceso de aprobación (8) En vigor (10)	Evalúa el estado en el que se encuentran las normativas sobre geometría, por medio de 5 escalas cualitativas de evaluación
	Incentivos económicos	Pocos incentivos (2) Créditos con baja tasa de interés (6) Beneficios fiscales inversión (6) Tarifas diferenciales (8) Subvención de la inversión (10)	Evalúa incentivos dando mayor importancia a aquellos que representan mayor ahorro de dinero para los inversores (las escalas superiores incluyen las inferiores)
	Ley de energías renovables	Ley regulatoria de ERNC (2) Ley regulatoria e incentivos (5) Lay regulatorio incentivos y metas (10)	Evalúa la ley de energías renovables, incentivos para las ERNC y metas específicas sobre geotermia, usando escalas acumulativas.

Nota. Elaborado por el investigador a partir de la normativa nacional.

De acuerdo con la calificación asignada, un proyecto de geotermia es viable desde aspectos legales y políticos si hay normas vigentes, incentivos económicos que subvencionen parte de la inversión, y que la regulación incentive alcanzar metas específicas en energías renovables.

Variables políticas legales Proyecto Nereidas.

El gobierno colombiano ha actualizado el marco legal que rige el desarrollo de proyectos de energía eléctrica a través de fuentes no convencionales, como se detalla en el Capítulo 2.5 del marco regulatorio. Esta revisión legal ha introducido incentivos fiscales y tributarios con el objetivo de fomentar la innovación, el desarrollo y la inversión en la generación de energías limpias, abarcando tecnologías como la nuclear, biomasa, hidroeléctrica, eólica, geotérmica y solar.

Estos incentivos se aplican de manera transversal a todas las tipologías de energías no convencionales y contemplan la reducción del 50% en la renta anual de las inversiones realizadas. Además, incluyen la exoneración del Impuesto al Valor Agregado (IVA) sobre equipos, elementos, maquinaria y servicios, tanto nacionales como importados, destinados a la preinversión e inversión relacionada con proyectos de energía limpia. Asimismo, se ofrecen incentivos arancelarios y depreciaciones aceleradas de activos (Bona & Coviello, 2016, p.64-65).

Adicionalmente, la Ley 1715 de 2014 establece normas específicas y líneas de acción para la energía geotérmica, las cuales serán explicadas en detalle a continuación:

- ✓ Encarga a la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) la realización de estudios para la reglamentación técnica del sector geotérmico.
- ✓ Promueve la evaluación del potencial geotérmico por parte del Gobierno nacional, fomentando el aprovechamiento integral de altas, medias y bajas temperaturas.
- ✓ Responsabiliza al Ministerio de Minas y Energía para definir metas y porcentajes de participación de la geotermia en el mercado energético nacional.

- ✓ Delega al Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible determinar los requerimientos ambientales de los proyectos de energía geotérmica.

Finalmente, la Resolución 40322 de 2022, establece los requisitos técnicos que regirán el registro geotérmico y los permisos de exploración y explotación del recurso geotérmico con fines de generación eléctrica.

Así las cosas, el Ministerio de Minas y Energía ha avanzado en la regulación de las nuevas tecnologías que le permiten al país avanzar hacia la carbono neutralidad, tal y como lo son la geotermia y el hidrógeno, de bajas emisiones, razón por la cual reglamentó los artículos 14,15, 21 y 23 de la Ley de Transición Energética. Con esta última expedición del 2022, se brinda seguridad jurídica a los inversionistas y se promueve el desarrollo de proyectos de generación de energía eléctrica con fuentes geotérmicas.

3.1.5 Variables ambientales

La variable ambiental en proyectos geotérmicos busca estimar el impacto en las operaciones de construcción y operación en relación con el medio ambiente. La norma ISO 14000 regula el impacto ambiental de empresas y proyectos mediante procedimientos que buscan mejorar el entorno en todos los aspectos, incluyendo proveedores y otros elementos externos. Este enfoque busca reducir los costos futuros asociados con la implementación de nuevas normativas y la reparación de problemas causados (Sapag, N. & Sapag, R., 2008).

Aunque los proyectos geotérmicos se consideran dentro del grupo de energías limpias y renovables con bajas emisiones de gases de efecto invernadero, algunos autores, como Kristmannsdóttir & Ármannsson (2003), destacan la importancia de evaluar los efectos ambientales asociados con el desarrollo geotérmico. Estos efectos pueden ser minimizados mediante una gestión adecuada del medio ambiente. Algunas de las principales consecuencias

Diseño de un modelo probabilístico para apoyar el estudio de incertidumbre y riesgo asociado a la ejecución del proyecto de Geotermia en Nereidas como ERNC en la región para CHEC S.A. E.S.P. BIC

incluyen alteraciones de la superficie debido a la adecuación de vías y plataformas de perforación, hundimientos por la perforación de pozos y extracción de fluidos, afectaciones a los ecosistemas por la instalación de oleoductos y líneas de transmisión, efectos del calor, liberación de gases no condensables a la atmósfera, y la construcción de plantas e instalación de equipos en lugares remotos.

En Colombia, es requisito que las corporaciones autónomas mantengan un registro geotérmico y se realice un proceso de licenciamiento ambiental que incluya diversas actividades en el plan de manejo ambiental.

Es importante señalar que estos efectos mencionados a menudo generan resistencia por parte de sectores ambientales y la comunidad en general, dando lugar a confrontaciones que pueden ralentizar o incluso paralizar definitivamente los proyectos energéticos. Un ejemplo de esta situación se vivió en Islandia, un país con alto potencial turístico y grandes riquezas naturales, donde la sociedad y el sector turístico se opusieron a los proyectos geotérmicos. Fue necesario realizar encuestas evaluativas que determinaron que la geotermia y el turismo pueden coexistir sin afectar la economía del turismo (Ingólfssdóttir & Gunnarsdóttir, 2020)

Higgins et. al. en 2017, afirmaron la necesidad de que la sociedad reciba información abierta, imparcial, oportuna y veraz sobre el proyecto que los impactará al momento de presentarse un conflicto de intereses, además concluyeron que la información debe presentarse en consonancia con la orientación ambiental de las personas para lograr su aceptación, siendo necesario el uso de técnicas para la transferencia de conocimiento que facilite la disposición a escuchar nueva información para evitar ser rechazada, todo esto se logró gracias a un análisis del proyecto geotérmico Costa del Golfo en Texas, una zona ambientalmente sensible en donde era necesario comprender las opiniones de las personas sobre estas tecnologías.

Por lo anterior, es fundamental realizar una investigación previa al desarrollo constructivo para abordar los impactos negativos que se deberán mitigar y los positivos a potenciar, todo esto con el fin de evitar problemas futuros en contra de la sostenibilidad ambiental, social y económica; una vez se considere viable un proyecto el siguiente paso es comunicar a la población y a los sectores involucrados con transparencia lo que se va a realizar, destacando los compromisos de los inversores y los beneficios de los proyectos de energía no convencional generando confianza en las personas (Carmona C.A. et. al., 2010).

A continuación, se definen las variables ambientales, los factores que la contienen y se califican de 1 a 10 con el fin de evaluar las mejores de ellas.

Tabla 10. Subfactores variable Ambiental

Variable	Subfactores	Escalas de Evaluación (0 a 10)	Descripción
	Cumplimiento de requerimientos ambientales	de No cumple (2) Cumple (4) Reinyección parcial (6) Reinyección o utilización del CO2 (8) Reinyección total (10)	Evalúa el cumplimiento de las normas ambientales, adicionalmente propone escalas adicionales relacionadas con la gestión en el proceso de reinyección de fluidos
Variable ambiental	Cumplimiento de plan de manejo ambiental	Incumplimiento de 4 o más de ítems de la norma (2) Incumplimiento de 3 ítems de la norma (4) Incumplimiento de 2 ítems de la norma (6) Incumplimiento de 1 ítems de la norma (8)	Se evalúa el incumplimiento de los siguientes ítems de la norma: medio abiótico (obras, mov, suelos, agua y aire), biótico (ecosistema, fauna y flora), socioeconómico (arqueología, programas de educación, y compensación) y seguridad industrial

Emisiones atmosféricas	No cumple (2) Cumple (4) Control total del He y H ₂ s (6) Reducción mayor de 18% de las emisiones (8) Huella de carbono cero-GEI (10)	Evalúa la ley de emisiones atmosféricas acorde con la norma, posteriormente según las buenas prácticas consideradas ideales en el manejo de emisiones
Vertimientos	No cumple (2) Cumple (4) Uso de fuentes de agua para refrigeración (6) Tratamiento total de vertimientos (8) Bajo consumo de agua externa (10)	Se evalúan los vertimientos acordes con la norma, posteriormente según las buenas prácticas consideradas ideales en el manejo de vertimientos

Nota. Elaborado por el investigador.

En este contexto, un proyecto contará con excelentes variables ambientales siempre que cuente con procesos de reinyección de fluidos, cumpla el plan de manejo ambiental determinado en la licencia ambiental, aporte significativamente a la reducción de huella de carbono, y vierta poco recurso hídrico pues el mismo debe ser reinyectado.

Variables ambientales Proyecto Nereidas.

La empresa Geoenergía Andina S.A., una filial de CHEC que fue liquidada en años anteriores, desempeñó un papel crucial en la identificación de áreas con potencial geotérmico en el Nevado del Ruiz. En 1994, la empresa tramitó la primera licencia ambiental del proyecto para la exploración geotérmica de la zona. Posteriormente, en 1997, formuló un estudio de impacto ambiental (EIA) específico para el pozo exploratorio N1 y otras actividades relacionadas con su desarrollo. En 2010, la empresa tuvo que adaptarse a nuevas regulaciones ambientales que exigían

destinar el 1% del total de la inversión del proyecto a actividades de recuperación, conservación, preservación y vigilancia de la cuenca hidrográfica Nereidas (Ingeniería STRYCON S.A.S., 2018).

En 2015, CHEC solicitó a la autoridad ambiental CORPOCALDAS los términos de referencia específicos para la formulación del estudio de impacto ambiental de cinco nuevos pozos exploratorios, que abarcaría todas sus fases constructivas en el área ya licenciada. Estos estudios de impacto ambiental (EIA) se centran en anticipar y analizar situaciones que puedan afectar al medio ambiente durante la exploración y explotación del recurso geotérmico. Como parte de estos estudios, se llevó a cabo un inventario de fauna, flora y análisis paisajísticos para evaluar la riqueza natural, identificando posibles soluciones que reduzcan y compensen las afectaciones.

A continuación, se mencionan algunos impactos detectados en el proyecto junto con sus respectivas medidas de prevención que deberán ser aplicadas:

- ✓ El funcionamiento de algunas máquinas requiere de una fuente de energía, siendo necesario emplear sistemas de generación diésel que puede causar contaminación atmosférica, que varía de acuerdo con los requerimientos energéticos necesarios.
- ✓ Captación de agua potable de fuentes hídricas para proveer a los trabajadores y a los procesos constructivos que lo requieran.
- ✓ Los residuos líquidos domésticos generados en la ejecución del proyecto, serán manejados en cada frente de trabajo con baterías sanitarias portátiles, las cuales serán adquiridas con un tercero encargado de la gestión y disposición final de los residuos.
- ✓ Los residuos líquidos industriales y especiales como los aceites usados deberán ser almacenados en contenedores metálicos y áreas establecidas, hasta ser entregados a gestores externos autorizados para su tratamiento y reúso. Las aguas residuales de perforaciones deberán tratarse previamente en el lugar empleando piscinas sedimentarias.

- ✓ Los residuos sólidos domésticos deberán ser almacenados en un área especial, la recolección estará a cargo de gestores externos autorizados para su aprovechamiento o disposición final en el relleno sanitario, dependiendo del tipo de residuo.
- ✓ Los residuos sólidos industriales y especiales se almacenarán de forma independiente para tener un manejo especial con cada uno, luego son entregados a un gestor externo autorizado encargado del tratamiento, reutilización y disposición final según sea el caso.
- ✓ Los gases generados por las perforaciones geotérmicas deben ser procesados por un quemador portátil a presión controlada, que sirve como sistema de contingencia para evitar la liberación de estas sustancias (Ingeniería STRYCON S.A.S., 2018).

3.1.6 Variables socio/culturales:

La energía geotérmica, como se ha mencionado previamente, es considerada una fuente de energía renovable con un impacto ambiental relativamente bajo y beneficios para las comunidades. Sin embargo, la variable sociocultural aborda las costumbres, pensamientos, inclinaciones y características que definen a la población, lo que resalta la importancia de una adecuada planificación y gestión social con las comunidades involucradas. En el contexto de los desarrollos geotérmicos, es esencial comprender las perspectivas de las partes interesadas, ya que estas pueden tener una alta incidencia en el éxito del proyecto. Identificar las comunidades rurales, étnicas o religiosas con diversas creencias, donde los líderes religiosos y sociales desempeñan un papel influyente, se vuelve crucial para establecer alianzas en pro del desarrollo comunitario.

Además, pueden surgir desafíos en la aceptación del proyecto por parte de la población, especialmente en comunidades con preocupaciones ambientales, sociales y económicas. Organizaciones no gubernamentales (ONGs) que defienden el medio ambiente y los intereses de

la sociedad pueden tener una participación activa en el proceso, abogando por la protección de bosques, ecosistemas, lugares de interés cultural y económico, y fuentes de agua limpia.

Las percepciones y la aceptación de la geotermia pueden variar considerablemente según la cultura, como señala Chavot et al. (2018). Por lo tanto, es crucial realizar estudios detallados e independientes en cada comunidad, incluso si están ubicadas en la misma región. Brindar información transparente y educativa a la población, especialmente en el contexto de un proyecto innovador como la energía geotérmica, se vuelve fundamental. Es necesario destacar las ventajas de la energía geotérmica en comparación con otras alternativas y abordar cualquier preocupación o mito relacionado con la contaminación de acuíferos o el aumento de la actividad sísmica en la zona.

Un estudio realizado por Carrcornish y Romanach (2014) enfatiza la importancia de la educación para cambiar las percepciones y condiciones de las personas respecto a la geotermia. Proporcionar información precisa y comprensible puede ayudar a mitigar los riesgos percibidos y abordar malentendidos, contribuyendo así a una mayor aceptación y apoyo comunitario para el proyecto geotérmico.

Setiyono et. al. (2019), considera que el apoyo del gobierno local y de las comunidades en cada una de las etapas del proyecto, facilita el tomar el hilo y la coordinación para la comprensión del proyecto geotérmico, además propone la realización de programas de responsabilidad social corporativo que cumplan con las necesidades de la población en materia de educación, cultura, salud y desarrollo económico de la región (basado en el turismo, agricultura y la promoción de capital de riesgo para emprendedores). Sin embargo, la participación y el compromiso público en los proyectos geotérmicos de forma periódica y estratégica con los desarrolladores, puede generar

confianza y mejorar la integración de la energía geotérmica con las comunidades locales (Ratio et. al., 2020; Payera et. al., 2020)

Posteriormente, uno de los principales conflictos sociales derivados de la geotermia se presenta con la ubicación de la planta y la perforación de pozos, ya que si estas son construidas en el entorno inmediato de las comunidades, el proyecto deja de ser positivo y atractivo para ellos, en la mayoría de los casos las personas prefieren que el campo se encuentre a una distancia superior a 100 km de sus hogares, siendo necesaria la reparación de las personas que se consideran afectadas directamente (Chavot et. al., 2018). A continuación, se establecen las variables sociales de un proyecto de geotermia, se describen y se evalúan con una escala de 1 a 10, con el fin de determinar las variables más atractivas para la ejecución el proyecto.

Tabla 11. *Subfactores variable social*

Variable	Subfactores	Escalas de Evaluación (0 a 10)	Descripción
Variable social	Identificación de comunidades especiales en el proyecto	de No cumple (2) Si tiene certificación del ministerio (5) Caracterización de las comunidades especiales (7) Incluir las comunidades especiales (10)	Evaluar la identificación de comunidad especiales por medio de la certificación e caracterización e inclusión socializaciones
	Capacitación al personal del proyecto	No cumple con los planes de capacitación (2) Capacitación al inicio del proyecto (4) Capacitación continua antes, durante y después del proyecto (6) Capacitación continua con identificación de necesidades (8)	Evalúa el alcance y como se realiza el proceso de capacitación al personal del proyecto y aquellos procesionales adicionales como la identificación de necesidades de evaluación y seguimiento

		Capacitación continua con identificación de necesidades, evaluación y seguimiento (10)	
Comunicación continua con la comunidad	la	Exclusión de las comunidades del proyecto (2) Generación de espacios informativos en torno al proyecto (5) Generación de espacios de información, interacción y escuchar al entorno al proyecto (7) Evaluación y seguimiento de la información interacción con los involucrados (10)	Evalúa la forma en que se comunica el proyecto con la comunidad por medio de espacios de información e interacción y se hacen proceso de seguimiento
Educación y sensibilización a la comunidad	la	No cumplimiento de los planes de educación y sensibilización (2) Educación y sensibilización al inicio del proyecto (4) Educación y sensibilización continua antes durante y después del proyecto (6) Educación y sensibilización continua con identificación de necesidades (8) Educación y sensibilización con identificación de necesidades,	Se evalúa el proceso de educación y sensibilización de la comunidad, teniendo presente su alcance, identificación de necesidades y su proceso de seguimiento

	evaluación y seguimiento (10)	
Aprovechamiento de la energía residual geotérmica en proyectos de uso directo	No hay aprovechamiento de la energía residual geotérmica en proyección de uso directo (2) Identificación de usos directos que benefician a la comunidad (4) Formulación e identificación de usos directos que benefician la comunidad (6) Implementación de proyectos de uso directo que benefician la comunidad (8) Análisis, evaluación y seguimiento del impacto de los usos directos en la comunidad (10)	Evalúa el avance en los proyectos de un directo con la energía residual geotérmica desde su identificación, formulación, implementación y seguimiento
Bienestar social- empleo infraestructura	No cumple con los planes de bienestar social, empleo de infraestructura (2) Identificación de planes enfocados en las necesidades de bienestar social del territorio (4) Formulación e identificación de los planes enfocados en el bienestar social en el territorio (8) Análisis, evaluación y seguimiento a la implementación de los planes de bienestar social (10)	Evalúa el avance en los planes de bienestar social, desde su identificación formulación, implementación, evaluación y seguimiento

Nota. Elaborado por el investigador con datos de CHEC S.A. E.S.P.

De conformidad con lo anterior, las mejores variables sociales refieren a (i) inclusión de comunidades especiales, (ii) capacitación permanente, revisión de necesidades y seguimiento a las mismas, (iii) evaluación de la información e interacción con los grupos de interés, (iv) educación y sensibilización constante, (iv) seguimiento al plan de bienestar social.

Variables socioculturales Proyecto Nereidas.

El proyecto geotérmico Valle de Nereidas llevó a cabo un exhaustivo estudio social que identificó las comunidades dentro del área de influencia del proyecto. Este estudio describió en detalle aspectos como el número de habitantes, costumbres, actividades agrícolas, economía, creencias y niveles de bienestar social de estas comunidades. El objetivo principal fue proyectar posibles efectos en la población para desarrollar un plan de acción que ayudara a reducir y compensar los impactos generados por las actividades previstas antes, durante y después de la construcción del proyecto. Se puso especial atención en aspectos críticos como la negociación de predios y servidumbres, la reubicación de la población en caso de ser necesario, y la localización y replanteo de la infraestructura social.

Adicionalmente, se implementaron dos estrategias fundamentales. La primera estrategia se centra en el proceso de divulgación del proyecto, mediante la instalación de espacios de participación con las comunidades e instituciones locales, así como con la participación activa de la CHEC. Estos espacios proporcionan información detallada sobre las actividades desarrolladas en la fase de exploración del proyecto, con el objetivo de mantener a la comunidad informada y establecer un diálogo transparente.

La segunda estrategia se orienta a promover la comunicación y participación comunitaria e institucional. Se busca mantener canales de comunicación activos entre todas las partes interesadas, lo que incluye a las comunidades locales, instituciones y la CHEC. Este enfoque tiene

Diseño de un modelo probabilístico para apoyar el estudio de incertidumbre y riesgo asociado a la ejecución del proyecto de Geotermia en Nereidas como ERNC en la región para CHEC S.A. E.S.P. BIC

como finalidad atender cualquier inquietud, queja o reclamo que pueda surgir en cada una de las fases del proyecto. La intención es proporcionar respuestas eficaces a las solicitudes y mantener relaciones positivas con todas las personas involucradas en el proyecto, reafirmando el compromiso con la transparencia y el diálogo abierto (Ingeniería STRYCON S.A.S., 2018).

3.1.7 Aplicación de las variables determinísticas al Proyecto Nereidas

Una vez establecidas las variables técnicas, económicas, políticas/legales, ambientales y sociales, y asignados puntajes a cada uno de los subfactores, surge la necesidad de evaluar a partir de las variables señaladas, las condiciones del proyecto Nereidas y de esta forma establecer las determinantes de este.

Para aplicar las variables al proyecto, se establecieron tres escenarios: pesimista, normal y optimista. Así las cosas, cada subfactor de cada variable se evaluó en los tres escenarios. El ejercicio incluyó, además, la justificación técnica – teórica de dicha evaluación.

El resultado determinístico se resume a continuación en la tabla 12. este recopila de cada una de las variables, plenamente identificadas anteriormente, con las escalas de evaluación (0 a 10) y las descripciones analizadas, cual es el valor que más se acerca al subfactor observado, de acuerdo a la evidencia o conocimiento actual del proyecto, identificando en la justificación la evidencia, hecho, o dato, práctico o teórico que procede al resultado. Al final se cuantifica y pondera por cada variable, así como se pondera la totalidad de las mismas, este resultado determinístico incorpora los componentes para determinar la factibilidad de un proyecto geotérmico, específicamente en este caso el de Valle de Nereidas.

Tabla 12. *Resultado Determinístico de las variables del proyecto Valle de Nereidas*

Variable	Subfactores	Escalas de evaluación (0 a 10)	Valle Nereidas - Colombia (escenarios)			Justificación	
			Pesimista (esc 1)	Normal (esc 2)	Optimista (esc 3)		
	Calidad del recurso del yacimiento	Líquido saturado (2) Líquido dominantes (4) Mezcla (6) Vapor dominantes (8) Vapor seco (10)	$X = 0$ $X < 0.2$ $0.2 < X < 0.6$ $0.6 < X < 1$ $X = 1$	4	6	8	Se debe hacer la perforación para hallar la composición del recurso - escenarios
	Temperatura del recurso	$T < 100^{\circ}\text{C}$ (2) $100^{\circ}\text{C} < T < 150^{\circ}\text{C}$ (4) $150^{\circ}\text{C} < T < 200^{\circ}\text{C}$ (6) $200^{\circ}\text{C} < T < 300^{\circ}\text{C}$ (8)		8	8	8	Temperatura del reservorio 250 - 260°C (Alfaro, 2005)
		$T > 300^{\circ}\text{C}$ (10)					
Variable Técnica	Selección tecnológica de la unidad de máxima capacidad	Contrapresión (2) Flash simple (4) Flash doble y triple (6) Binaria (8) Vapor seco (10)		2	4	8	Se tienen varias opciones, hasta ahora la más viable es flash simple (4) - escenarios
	Eficiencia de los sistemas adicionales de generación	Sin sistemas adicionales de generación (0) Modulares a contrapresión (2) Modulares flash simple (4) Modulares binarias (6) Ciclos combinados (8) Combinación ciclo combinado y modulares (10)		0	4	6	Actualmente se estudia la posibilidad de tener plantas modulares flash simple que reduzcan el riesgo en la inversión-escenarios
	Desarrollo de infraestructura - distancia a centros poblados > 15.000 habitantes	$d > 50$ km (2) 30 km < $d < 50$ km (4) 15 km < $d < 30$ km (6) 5 km < $d < 15$ km (8) $d < 5$ km (10)		4	6	6	En línea recta el campo geotérmico hasta Manizales tiene 20 km aprox. Hasta SE nivel 115kV y 230 kV Enea (Google Earth) - escenarios
	Subtotal	Variable técnico		4	5,8	7,4	
Factor económico / financiero	CAPEX - (MDD / MW)	$\$ > 6$ (2) $4,9 < \$ < 6$ (4) $3,9 < \$ < 4,9$ (6) $2,8 < \$ < 3,9$ (8) $\$ < 2,8$ (10)		2	4	6	Estimación: \$US 5.4 millones/ MW (Strycon, 2017) - escenarios
	LCOE - (USD/ kWh)	$\$ > 0.13$ (2) $0.1 < \$ < 0.13$ (4) $0.8 < \$ < 0.1$ (6) $0.05 < \$ < 0.08$ (8) $\$ < 0.05$ (10)		6	8	10	Estimación optimista: \$US 0.05/kWh para tecnología flash (estudio U. Javeriana) - escenarios
	Subtotal	Variable económica /financiera		4,4	6,4	8,4	
Variable político / legal	Normativas y regulaciones sobre geotermia	Inexistente (2) En propuesta (4) En borrador (6) En proceso de aprobación (8) En vigor (10)		10	10	10	Ley 1715 de 2014
	Incentivos económicos	Pocos incentivos (2) Créditos con baja tasa de interés (4) Beneficios fiscales en inversión (6)		6	6	10	Se brindan múltiples beneficios

Diseño de un modelo probabilístico para apoyar el estudio de incertidumbre y riesgo asociado a la ejecución del proyecto de Geotermia en Nereidas como ERNC en la región para CHEC S.A. E.S.P. BIC

Variable	Subfactores	Escala de evaluación (0 a 10)	Valle Nereidas - Colombia (escenarios)			Justificación
			Pesimista (esc 1)	Normal (esc 2)	Optimista (esc 3)	
		Tarifas diferenciales (8) Subvención de la inversión (10)				fiscales en la Ley 1715 - escenarios
	Ley de energías renovables	Ley regulatoria de ERNC (2) Ley regulatoria e incentivos (5) Ley regulatoria, incentivos y metas sobre geotermia (10)	5	5	10	Ley 1715 regula las ERNC y da incentivos - escenarios
	Subtotal	Variable político /legal	6,5	6,5	10	
	Cumplimiento de requerimientos ambientales	No cumple (2) Cumple (4) Reinyección parcial (6) Reinyección o utilización de CO2 (8) Reinyección total (10)	4	6	8	Se plantea la reinyección del máximo porcentaje posible y que sea económicamente viable - escenarios
Variable ambiental	Cumplimiento del plan de manejo ambiental	Incumplimiento de 4 o más ítems de la norma (2) Incumplimiento de 3 ítems de la norma (4) Incumplimiento de 2 ítems de la norma (6) Incumplimiento de 1 ítem de la norma (8) Cumplimiento total del plan de manejo ambiental (10)	6	8	10	La empresa considera primordial cumplir totalmente con el plan de manejo ambiental, sin embargo, se considerará optimista - escenarios
	Emisiones atmosféricas	No cumple (2) Cumple (4) Control del Hg y H2S (6) Reducción mayor al 85% de las emisiones (8) Huella de carbono cero -GEI (10)	4	6	8	En la planeación se considera importante controlar el Hg y el H2S por sus impactos - escenarios
	Vertimientos	No cumple (2) Cumple (4) Uso de fuentes de agua externas a la zona para la refrigeración (6) Tratamiento total de vertimientos (8) Bajo consumo de agua externa (10)	6	8	10	Se tiene contemplado el tratamiento total de los vertimientos generados en Valle de Nereidas - escenarios
	Subtotal	Variable ambiental	4,8	6,8	8,8	
	Identificación de comunidades especiales en el proyecto	No cumple (2) Se tiene certificación del ministerio (5) Caracterización de las comunidades especiales (7) Incluir a las comunidades especiales en la socialización (10)	7	10	10	Ya se tiene una caracterización de la comunidad aledaña al proyecto, no hay comunidades especiales - escenarios
Variable socio /cultural	Capacitación al personal del proyecto	No cumple con los planes de capacitación (2) Capacitación al inicio del proyecto (4) Capacitación continua antes, durante y después del proyecto (6) Capacitación continua con identificación de necesidades (8) Capacitación continua con identificación de necesidades, evaluación y seguimiento (10)	6	10	10	La empresa espera realizar capacitación continua al personal del proyecto, identificando necesidades - escenarios
	Comunicación continua con la comunidad	Exclusión de las comunidades del proyecto (2) Generación de espacios informativos en torno al proyecto (5) Generación de espacios de información, interacción y escucha en torno al proyecto (7) Evaluación y seguimiento de la información e interacción con los involucrados (10)	5	10	10	La empresa es consciente de generar espacios de información, interacción y

Variable	Subfactores	Escalas de evaluación (0 a 10)	Valle Nereidas - Colombia (escenarios)			Justificación
			Pesimista (esc 1)	Normal (esc 2)	Optimista (esc 3)	
						escucha con la comunidad - escenarios
	Educación y sensibilización a la comunidad	No cumplimiento de los planes de educación y sensibilización (2) Educación y sensibilización al inicio del proyecto (4) Educación y sensibilización continua antes, durante y después del proyecto (6) Educación y sensibilización continua con identificación de necesidades (8) Educación y sensibilización con identificación de necesidades, evaluación y seguimiento (10)	6	10	10	Se planea un programa de educación y sensibilización permanente con la comunidad, identificando sus necesidades en el tiempo - escenarios
	Aprovechamiento de la energía residual geotérmica en proyectos de uso directo	No hay aprovechamiento de la energía residual geotérmica en proyectos de uso directo (2) Identificación de usos directos que benefician a la comunidad (4) Formulación e identificación de usos directos que beneficien la comunidad (6) Implementación de proyectos de uso directo que beneficien la comunidad (8) Análisis, evaluación y seguimiento del impacto de los usos directos en la comunidad (10)	6	8	10	Se proyecta formular e identificar usos directos que puedan beneficiar a la comunidad, sin embargo, es necesaria la búsqueda de inversión - escenarios
	Bienestar social - empleo e infraestructura	No cumple con los planes de bienestar social, empleo e infraestructura (2) Identificación de planes enfocados en las necesidades de bienestar social del territorio (4) Formulación e identificación de planes enfocados en el bienestar social del territorio (6) Generar sinergia institucional para implementar los planes de bienestar social en el territorio (8) Análisis, evaluación y seguimiento a la implementación de los planes de bienestar social (10)	6	8	10	Se espera generar bienestar social en la comunidad, por medio del empleo, mejora de la infraestructura y desarrollo de nuevas actividades económicas - escenarios
	Subtotal	Variable socio /cultural	5,8	9,4	10	
		TOTAL	5,0	7,0	8,9	

Nota. Elaborado por el investigador con datos de CHEC S.A. E.S.P.

En este contexto, después de evaluar el proyecto Nereidas, se observa que los puntajes más bajos se encuentran en las variables técnicas y económicas, mientras que la variable socio/cultural presenta un puntaje más alto. Sin embargo, el inversionista necesita información adicional que le permita identificar cuál es el escenario más probable en cada una de las variables del proyecto. La diferencia entre cada escenario es significativa y podría llevar a la toma de decisiones desacertadas.

Para ejemplificar esta situación, consideremos la variable técnica en el resumen del proyecto Nereidas presentado anteriormente. La calificación para esta variable fue la siguiente:

Diseño de un modelo probabilístico para apoyar el estudio de incertidumbre y riesgo asociado a la ejecución del proyecto de Geotermia en Nereidas como ERNC en la región para CHEC S.A. E.S.P. BIC

Escenario pesimista: 4,0

Escenario normal: 5,8

Escenario optimista: 7,4

Surge la pregunta: ¿Cuál es la probabilidad de ocurrencia de cada escenario? Para abordar esta incertidumbre, en el capítulo 4 del informe se aplicarán modelos probabilísticos que permitan estimar las probabilidades asociadas a cada uno de los escenarios. Este enfoque proporcionará al inversionista una visión más completa y cuantitativa de las posibles variaciones en las variables del proyecto, lo que facilitará la toma de decisiones informadas.

3.2 Matriz de Riesgos Proyecto Nereidas

En el caso de los posibles riesgos, impactos, consecuencias, entre otros a nivel determinístico potenciales en el proyecto de Geotermia Valle Nereidas en CHEC S.A E.S.P. BIC se emplea la metodología de análisis de riesgos. Se advierte que el alcance a este nivel son las exploraciones y perforaciones iniciales, aún no se tienen en cuenta, el sistema de vapor ductos de distribución, la planta de energía, la conexión al sistema de transmisión y distribución, dado que por proyecto es una etapa posterior de riesgo y deberá suplirse primero esta primera etapa de exploración.

3.2.1 Guía Metodológica para la Gestión Integral de Riesgos CHEC, versión 4 (2021), que aplica para CHEC S.A. E.S.P. BIC y para las empresas del Grupo EPM.

La Gestión Integral de Riesgos (GIR) se concibe como una herramienta fundamental para alcanzar los objetivos estratégicos y tácticos, así como para tomar decisiones informadas en CHEC S.A. E.S.P. Se tiene en cuenta la interacción entre los procesos, proyectos, negocios y contratos dentro de la empresa y su relación con el entorno. La GIR proporciona una serie de beneficios clave, entre los cuales se destacan la identificación anticipada de posibles sucesos que podrían

afectar el logro de los objetivos, el respaldo y documentación de la toma de decisiones, la mitigación y prevención de pérdidas, la facilitación del cumplimiento de normativas y regulaciones adaptables, así como la generación de confianza con los grupos de interés.

Esta guía metodológica ha sido diseñada a medida, considerando las particularidades y necesidades específicas de las empresas del Grupo EPM. Se basa en los requisitos establecidos en la Norma Técnica de Calidad en la Gestión Pública NTC GP 1000:2009 y en el Modelo Estándar de Control Interno MECI 1000:2014. Además, se incorporan las mejores prácticas y estándares de gestión de riesgos a nivel nacional e internacional. Se capitalizan las oportunidades de mejora identificadas en versiones anteriores de las guías de gestión integral de riesgos.

Para analizar el escenario de riesgos relacionados con las diferentes etapas del proyecto de Geotermia, se emplean las fases definidas en la gestión integral de riesgos. Estas etapas se presentan en la figura 11. lo que proporciona una estructura sólida y completa para la identificación, evaluación y manejo de riesgos a lo largo del ciclo de vida del proyecto.

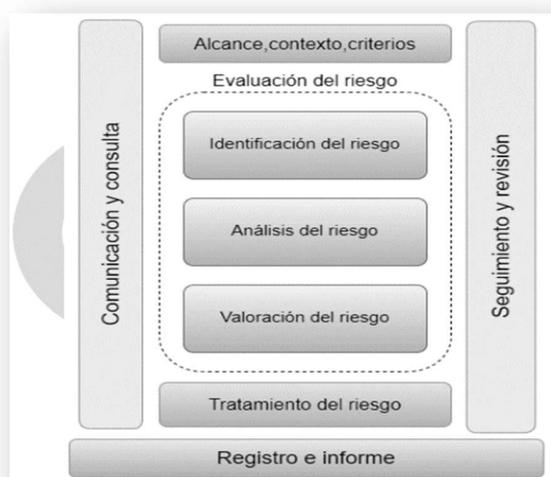


Figura 11 . *Etapas de la gestión integral de riesgos* .Nota. Guía Metodológica para la Gestión de Riesgos CHEC versión 4 (2021). Adaptado de ISO 31000:2018. Gestión del riesgo directrices. Ginebra Suiza.

Cada una de las etapas contenidas en la figura 11 se detallan a continuación.

Establecer el Contexto de Riesgos de exploración geotermia

En esta primera etapa se busca identificar el entorno interno y el externo del nivel de gestión sobre el cual se hace el análisis. Para este fin se considera la información que se presenta a continuación, como apoyo para determinar de la forma más adecuada el entorno base para el análisis de riesgos.

Ver Fase y escenario de Riesgos, de los cuales se resume en la Tabla 12

- Objetivos del nivel de gestión: Determinar posibles consecuencias que tendrá el diseño, exploración y construcción del proyecto Geotérmico.
- Resultados del análisis del entorno externo que permitan identificar amenazas para el nivel de gestión en estudio, así como resultados del desempeño organizacional y el entorno interno que permite identificar debilidades.
- Documentación asociada al nivel de gestión objeto de análisis. La documentación puede incluir según el nivel de gestión: documentos de direccionamiento estratégico, el plan estratégico de Grupo Empresarial EPM, los planes empresariales, caracterización del proceso (nomograma, objetivo, alcance, principales actividades, entradas y salidas), plan de dirección del proyecto, presupuesto, cronograma, planes de acción, desempeño de indicadores, resultados de auditorías externas e internas, eventos materializados, entre otros.
- Resultados obtenidos de análisis de riesgos previos realizados al nivel de gestión en estudio u otros niveles de gestión relacionados. Esto con el fin de conocer si alguno de los riesgos identificados en otro nivel de gestión se puede llegar a materializar en el nivel analizado.

Resultado del análisis del entorno externo e interno para la gestión de riesgos (exploración y perforaciones previo a construcción de planta de energía y línea STR de conexión)

Tabla 13. *Escenarios de riesgo proyecto geotermia*

Código del riesgo	Fase	Escenario de riesgo	Origen
1	2 – Actualizar EIA para Licencia de perforaciones profundas exploratorias	Demoras en el otorgamiento de la licencia	Interno
2	5 – Perforaciones profundas adicionales	Bajo potencial geotérmico que haga inviable el proyecto después de la primera perforación.	Interno
3	2 – Actualizar EIA para Licencia de perforaciones profundas exploratorias	No obtención de permisos / licencias / otras aprobaciones regulatorias para el proyecto (ej.: permisos ambientales)	Externo
4	2 – Actualizar EIA para Licencia de perforaciones profundas exploratorias	Cambios en las especificaciones para los diseños de infraestructura y sitios de perforación, que implican modificaciones al EIA	Externo
5	3 – Diseños detallado de pozos	Selección equivocada de un contratista para el diseño de pozos o con especificaciones insuficientes	Interno
6	General del Proyecto	Cambios en el personal clave del proyecto	Interno
7	1 - Identificar sitios de perforación	Fallas/ deficiencias en los estudios geo científicos	Externo
8	4 – Primera perforación profunda y restitución de vías	Decisiones equivocadas ante imprevistos durante la perforación	Interno/Externo
9	2 – Actualizar EIA para Licencia de perforaciones profundas exploratorias	Oposición al desarrollo del proyecto por parte de los grupos de interés (comunidad, ONG)	Externo
10	2 – Actualizar EIA para Licencia de perforaciones profundas exploratorias	Interferencia de proyectos, implica competir por el otorgamiento de licencia para un recurso común	Externo
11	General del Proyecto	Fallas en los supuestos para la modelación financiera	Interno
12	4 – Primera perforación profunda y restitución de vías	Retraso en la consecución de recursos financieros	Interno
13	4 – Primera perforación profunda y restitución de vías	Conflictos con el perforador ante incumplimientos o fallas en la perforación.	Interno
14	5 – Perforaciones profundas adicionales	Conflictos con el perforador ante incumplimientos o fallas en la perforación.	Interno
15	1 - Identificar sitios de perforación	Dudas en Planeación Generación sobre no contar con la información suficiente para tomar decisiones para perforar	Externo
16	4 – Primera perforación profunda y restitución de vías	Riesgos inherente a la actividad de perforación del pozo (explosión, incendio, colapso, gases tóxicos, rotura de tubería de perforación, retrasos).	Interno
17	5 – Perforaciones profundas adicionales	Riesgos inherentes a la actividad de perforación del pozo (explosión, incendio, colapso, gases tóxicos, rotura de tubería de perforación, retrasos).	Interno

Diseño de un modelo probabilístico para apoyar el estudio de incertidumbre y riesgo asociado a la ejecución del proyecto de Geotermia en Nereidas como ERNC en la región para CHEC S.A. E.S.P. BIC

Código del riesgo	Fase	Escenario de riesgo	Origen
18	General del Proyecto	Condicionamiento del diseño y construcción de pozos con el mismo contratista, implicando posibles sobre costos (por conflicto de intereses). Nota. Aunque no es obligatorio que el diseño y construcción sea con el mismo contratista, se disminuyen los riesgos en la interpretación e implementación de la construcción si el diseñador coincide con el constructor.	Interno/Externo
19	5 – Perforaciones profundas adicionales	Decisiones equivocadas ante imprevistos durante la perforación	Interno/Externo
20	4 – Primera perforación profunda y restitución de vías	Condiciones físicas desfavorables no previstas durante la perforación. Fallar en la perforación del pozo (desvíos no planeados, no encontrar el recurso, encontrar impermeabilidad, no alcanzar presiones deseadas)	Interno
21	5 – Primera perforación profunda y restitución de vías	Condiciones físicas desfavorables no previstas durante la perforación. Fallar en la perforación del pozo (desvíos no planeados, no encontrar el recurso, encontrar impermeabilidad, no alcanzar presiones deseadas) (recomendamos borrar esta fila, porque es exactamente igual al riesgo anterior 22)	Interno
22	4 – Primera perforación profunda y restitución de vías	No consecución de recursos por terceros que faciliten la decisión de invertir en perforaciones (recursos BID, NAMA, etc.)	Interno
23	5 – Perforaciones profundas adicionales	No consecución de recursos por terceros que faciliten la decisión de invertir en perforaciones (recursos BID, NAMA, etc.)	Interno
24	General del Proyecto	Demoras en la toma de decisiones dentro del proyecto o de la organización con respecto al proyecto	Interno
25	5 – Perforaciones profundas adicionales	Actividad volcánica y/o sísmica adversa al proyecto (afectando la infraestructura existente para pozos y accesos) Nota. El riesgo se presenta en cualquier etapa y se deja la más crítica	Externo
26	4 – Primera perforación profunda y restitución de vías	Hallazgos arqueológicos durante la ejecución del proyecto. Nota. Se puede presentar en varias etapas del proyecto (en otros riesgos, a pesar de que sucedan en diferentes etapas las consecuencias o probabilidades cambian y por esa razón los incluimos en dos filas diferentes, sin embargo creemos que este riesgo tendría las mismas probabilidades y consecuencias entonces pensamos que no es necesario duplicar la celda, ¿de acuerdo?)	Externo
27	4 – Primera perforación profunda y restitución de vías	Afectación negativa a los recursos naturales (flora, fauna, aguas) como consecuencia de la ejecución del proyecto	Interno
28	4 – Primera perforación profunda y restitución de vías	Dificultad en la obtención de la servidumbre de terreno o permiso de uso del mismo para las perforaciones por parte de los propietarios	Externo
29	4 – Primera perforación profunda y restitución de vías	Sobre expectativas de la comunidad La comunidad exige mucha más inversión social que la presupuestada en el proyecto	Interno/Externo
30	2 – Actualizar EIA para Licencia de perforaciones profundas exploratorias	Sanciones por incumplimiento regulatorio	Interno
31	4 – Primera perforación profunda y restitución de vías	Sanciones por incumplimiento regulatorio	Interno
32	5 – Perforaciones profundas adicionales	Sanciones por incumplimiento regulatorio	Interno
33	5 – Perforaciones profundas adicionales	Sobrecostos o tiempos adicionales en implementaciones de controles innecesarios.	Interno

Código del riesgo	Fase	Escenario de riesgo	Origen
34	General del Proyecto	Competencia con otros proyectos por recursos en los cuales la empresa tiene más experiencia (recursos humanos y financieros)	Interno
35	5 – Perforaciones profundas adicionales	Sobre expectativas de la comunidad La comunidad exige mucha más inversión social que la presupuestada en el proyecto	Interno/Externo
36	4 – Primera perforación profunda y restitución de vías	Falta de credibilidad/apoyo en el proyecto por parte de las directivas de la organización	Interno
37	5 – Perforaciones profundas adicionales	Falta de credibilidad/apoyo en el proyecto por parte de las directivas de la organización	Interno

Nota. Elaborado por el investigador con Metodología de CHEC S.A. E.S.P.

3.2.1.1 Evaluar Controles Riesgos

En esta etapa se valoran los controles existentes y se califican los 37 riesgos en su probabilidad y consecuencia, teniendo como referencia la eficacia de los controles existentes. La calificación de los riesgos se hace con el objeto de priorizar la gestión de acuerdo con el nivel de riesgos de cada escenario. Evaluación Controles Tabla 14

3.2.1.2 Evaluación de controles

Para el efecto los controles existentes tanto preventivos como correctivos y que a continuación se describen tiene un promedio, resultado de la incidencia que tiene ese control en la mitigación del escenario de riesgo. Evaluándolo como un control muy bajo (1), bajo (2) , medio (3), alto (4) , muy alto (5).

Diseño de un modelo probabilístico para apoyar el estudio de incertidumbre y riesgo asociado a la ejecución del proyecto de Geotermia en Nereidas como ERNC en la región para CHEC S.A. E.S.P. BIC

Tabla 14. Promedio de Controles matriz de riesgos

Promedio de los controles	3,27	Medio
---------------------------	------	-------

Nota. Elaborado por el investigador.

Los resultados de los controles reflejan un efecto medio, lo cual coincide en que varios de los escenarios riesgos a través de los controles podrán ser mitigados parcial o totalmente previo al proceso de exploración y/o perforación inicial.

Tabla 15. Evaluación del Control matriz de riesgos

Código del riesgo	Fase	Escenario de riesgo	Controles preventivos existentes	Controles correctivos existentes	Evaluación del control
1	2 – Actualizar EIA para Licencia de perforaciones profundas exploratorias	Demoras en el otorgamiento de la licencia	Gestión oportuna de los trámites ambientales para actualizar licencia ambiental mediante una adecuada asesoría jurídica Reuniones de divulgación de avance del proyecto con las autoridades ambientales (Corpocaldas y ANLA)	Acercamiento con la Autoridad ambiental y propuesta de plan de acción para acompañar el desarrollo de la geotermia en Colombia a través de mesas de trabajo con actores involucrados	Alto
2	5 – Perforaciones profundas adicionales	Bajo potencial geotérmico que haga inviable el proyecto después de la primera perforación.	Contratación de asesor experto. Buscar una asesoría de expertos en el tema que validen la calidad y precisión de los estudios Geo científicos.		Medio
3	2 – Actualizar EIA para Licencia de perforaciones profundas exploratorias	No obtención de permisos / licencias / otras aprobaciones regulatorias para el proyecto (ej.: permisos ambientales)	Conformar un equipo responsable de mantener el cumplimiento de todos los requisitos normativos, regulatorios y jurídicos que se relacionan con las actividades técnicas, ambientales y económicas del proyecto. Tener un control sobre la calidad de los estudios exigidos por la autoridad ambiental y contratar a empresas con experiencia previa en EIA y con conocimiento de la normatividad aplicable (<i>esta recomendación aún no es existente, se debe poner como un control preventivo pero pendiente por desarrollar</i>)	Asignar al contratista que ejecuta el EIA y quien realiza los trámites de la licencia para que sea responsable del seguimiento a las inquietudes dadas por la autoridad ambiental	Muy bajo
4	2 – Actualizar EIA para Licencia de perforaciones profundas exploratorias	Cambios en las especificaciones para los diseños de infraestructura y sitios de perforación, que implican modificaciones al EIA	Integración del contrato del EIA con el diseño de infraestructura Consultas previas con autoridad ambiental para revisar posibles cambios Gestión social e involucramiento con los dueños del proyecto		Alto
5	3 – Diseños detallado de pozos	Selección equivocada de un contratista para el diseño de pozos o con especificaciones insuficientes	Criterios para la selección del contratista dados por DEWHURST, ECP o Baker	Contratar a otra empresa para adecuar los estudios	Bajo
6	General del Proyecto	Cambios en el personal clave del proyecto	Plan de transferencia de conocimientos para ampliar la base de personas que dominen las diferentes disciplinas involucradas Concientizar a los tomadores de decisiones sobre la importancia del conocimiento especializado para la gestión apropiada de este proyecto.	Contratación del reemplazo y capacitarlo (o que esta nueva persona conozca a priori sobre el tema del proyecto)	Medio
7	1 - Identificar sitios de perforación	Fallas/ deficiencias en los estudios geo científicos	Interventoría interdisciplinaria a cargo de EPM-CHEC, ECP, Baker		Bajo

Código del riesgo	Fase	Escenario de riesgo	Controles preventivos existentes	Controles correctivos existentes	Evaluación del control
8	4 – Primera perforación profunda y restitución de vías	Decisiones equivocadas ante imprevistos durante la perforación	Seguimiento detallado a las perforaciones y mantener asesoría de expertos en el tema que conceptúe sobre la calidad del informe presentado. Contratar un diseñador de perforación con experiencia previa en este tipo de actividad. Revisión y validación de estudios geo científicos previos por parte del diseñador.		Alto
9	2 – Actualizar EIA para Licencia de perforaciones profundas exploratorias	Oposición al desarrollo del proyecto por parte de los grupos de interés (comunidad, ONG)	i) Suministro de información permanente y oportuna a las comunidades e instituciones sobre las características del proyecto y los beneficios para la región y el país. ii) Mantener informada a las autoridades sobre las actividades que se desarrollan para la construcción del proyecto. iii) Mantener un monitoreo de la dinámica social alrededor del territorio donde está localizado el proyecto. iv) Visibilizar el papel de la CHEC en el liderazgo regional del proyecto. v) Implementar planes de compensación	Experiencia y capacidad de negociación y manejo de conflictos del equipo de Gestión Social de CHEC/EPM	Alto
10	2 – Actualizar EIA para Licencia de perforaciones profundas exploratorias	Interferencia de proyectos, implica competir por el otorgamiento de licencia para un recurso común	Adelantar gestiones ante las autoridades que permitan establecer un marco legal que garantice el manejo adecuado de un recurso común.	Seguimiento al trámite de terceros intervinientes con ISAGEN.	Muy alto
11	General del Proyecto	Fallas en los supuestos para la modelación financiera	Conocimiento y experiencia del equipo técnico y financiero de CHEC-EPM Desarrollo de Capacidades en CHEC-EPM Contar con apoyo de experto en el tema Exigencia en los términos de referencia para la contratación de los estudios de factibilidad Una adecuada experiencia del consultor en la elaboración de la estructura de costos del proyecto que sea técnicamente soportada y sustentable como insumo fundamental para la evaluación financiera.	Conocimiento y experiencia del equipo técnico y financiero de CHEC-EPM Preacuerdos con Bancos y demás instituciones financieras	Medio
12	4 – Primera perforación profunda y restitución de vías	Retraso en la consecución de recursos financieros	Cierre financiero del proyecto Flujo de caja suficiente y oportuno. Desde etapas tempranas del proyecto, sensibilizar a los tomadores de decisiones sobre las altas inversiones y riesgo que se vendrán más adelante (concientizar)	Créditos contingentes preaprobados	Medio
13	4 – Primera perforación profunda y restitución de vías	Conflictos con el perforador ante incumplimientos o fallas en la perforación.		Sanciones y pólizas que permitan cubrir este riesgo.	Medio
14	5 – Perforaciones profundas adicionales	Conflictos con el perforador ante incumplimientos o fallas en la perforación.		Sanciones y pólizas que permitan cubrir este riesgo.	Medio
15	1 - Identificar sitios de perforación	Dudas en Planeación Generación sobre no contar con la información suficiente para tomar decisiones para perforar	Buscar una asesoría de expertos en el tema que conceptúe sobre la calidad del informe presentado.	realizar estudios geo científicos adicionales	Medio
16	4 – Primera perforación profunda y restitución de vías	Riesgos inherentes a la actividad de perforación del pozo (explosión, incendio, colapso, gases tóxicos, rotura de tubería de perforación, retrasos).		Sanciones y pólizas que permitan cubrir este riesgo	Alto

Diseño de un modelo probabilístico para apoyar el estudio de incertidumbre y riesgo asociado a la ejecución del proyecto de Geotermia en Nereidas como ERNC en la región para CHEC S.A. E.S.P. BIC

Código del riesgo	Fase	Escenario de riesgo	Controles preventivos existentes	Controles correctivos existentes	Evaluación del control
17	5 – Perforaciones profundas adicionales	Riesgos inherentes a la actividad de perforación del pozo (explosión, incendio, colapso, gases tóxicos, rotura de tubería de perforación, retrasos).		Sanciones y pólizas que permitan cubrir este riesgo	Alto
18	General del Proyecto	Condicionamiento del diseño y construcción de pozos con el mismo contratista, implicando posibles sobre costos (por conflicto de intereses).	Desde los Pliegos de Condiciones garantizar que los diseños se ajusten a Normas Internacionales y prácticas generalizadas en geotermia. Interventoría de diseños y construcción Contar como mínimo con dos oferentes en la licitación donde uno de los criterios de selección sea el precio de la propuesta.	Seguimiento detallado a las actividades del contratista para asegurar que no se condicionen el diseño y construcción de pozos Participación de la interventoría en la toma de decisiones cuando hay diferencias que impliquen sobrecostos.	Bajo
19	5 – Perforaciones profundas adicionales	Decisiones equivocadas ante imprevistos durante la perforación	Seguimiento detallado a las perforaciones y mantener asesoría de expertos en el tema que conceptúe sobre la calidad del informe presentado. Contratar un diseñador de perforación con experiencia previa en este tipo de actividad.		Alto
20	4 – Primera perforación profunda y restitución de vías	Condiciones físicas desfavorables no previstas durante la perforación. Fallar en la perforación del pozo (desvíos no planeados, no encontrar el recurso, encontrar impermeabilidad, no alcanzar presiones deseadas)	Modelo conceptual elaborado por equipo profesional con experiencia. Sanciones y pólizas que permitan cubrir este riesgo.	Póliza para etapa exploratoria	Medio
21	5 – Primera perforación profunda y restitución de vías	Condiciones físicas desfavorables no previstas durante la perforación. Fallar en la perforación del pozo (desvíos no planeados, no encontrar el recurso, encontrar impermeabilidad, no alcanzar presiones deseadas)	Modelo conceptual elaborado por equipo profesional con experiencia. Sanciones y pólizas que permitan cubrir este riesgo.	Póliza para etapa exploratoria	Medio
22	4 – Primera perforación profunda y restitución de vías	No consecución de recursos por terceros que faciliten la decisión de invertir en perforaciones (recursos BID, NAMA, etc.)	Por las características ambientales y tecnológicas del proyecto con altísimo riesgo, conformar un equipo de trabajo para gestionar fuentes de financiación nacional e internacional (créditos blandos) que viabilicen financieramente el proyecto.	Gestionar recursos propios y mostrar los beneficios del proyecto	Medio
23	5 – Perforaciones profundas adicionales	No consecución de recursos por terceros que faciliten la decisión de invertir en perforaciones (recursos BID, NAMA, etc.)	Por las características ambientales y tecnológicas del proyecto con altísimo riesgo, conformar un equipo de trabajo para gestionar fuentes de financiación nacional e internacional (créditos blandos) que viabilicen financieramente el proyecto.	Gestionar recursos propios y mostrar los beneficios del proyecto	Medio
24	General del Proyecto	Demoras en la toma de decisiones dentro del proyecto o de la organización con respecto al proyecto	Conocimiento y experiencia del equipo técnico y financiero de CHEC-EPM Desarrollar Capacidades en CHEC-EPM Contar con apoyo de experto en el tema El equipo de trabajo EPM+CHEC (no los líderes) deben siempre tener una recomendación unificada para apoyar la decisión de los líderes	De ser posible, unificar los espacios de reunión para los tomadores de decisiones de EPM y CHEC.	Medio
25	5 – Perforaciones profundas adicionales	Actividad volcánica y/o sísmica adversa al proyecto (afectando la infraestructura existente para pozos y accesos) Nota. El riesgo se presenta en cualquier etapa y se deja la más crítica	Adelantar estudios de la sísmica del terreno su amenaza y sus riesgos para el proyecto (aunque esta actividad no evita la posible amenaza natural, permite conocer la zona y valorar la real probabilidad de su ocurrencia).	Cobertura de la póliza	Bajo

Código del riesgo	Fase	Escenario de riesgo	Controles preventivos existentes	Controles correctivos existentes	Evaluación del control
26	4 – Primera perforación profunda y restitución de vías	Hallazgos arqueológicos durante la ejecución del proyecto.	Prospección arqueológica	Ajuste de actividades del proyecto y aplicación de procedimientos indicados por la autoridad ambiental	Medio
27	4 – Primera perforación profunda y restitución de vías	Afectación negativa a los recursos naturales (flora, fauna, aguas) como consecuencia de la ejecución del proyecto		Plan de contingencia para este evento	Alto
28	4 – Primera perforación profunda y restitución de vías	Dificultad en la obtención de la servidumbre de terreno o permiso de uso del mismo para las perforaciones por parte de los propietarios	Suministro de información permanente y oportuna a los dueños de los predios sobre los avances del proyecto y los beneficios para la región y el país y Visibilizar el papel de la CHEC en el liderazgo regional del proyecto.	Conciliar, buscar mecanismos de compensación, expropiar	Bajo
29	4 – Primera perforación profunda y restitución de vías	Sobre expectativas de la comunidad La comunidad exige mucha más inversión social que la presupuestada en el proyecto	i) Reuniones informativas oportunas con los grupos de interés (comunidades e instituciones) sobre las características del proyecto y los beneficios para la región y el país. Supuesto. Presupuesto detallado del proyecto para inversión social. ii) Visibilizar el papel de la CHEC en el liderazgo regional del proyecto. iii) Suministro de información permanente y oportuna a las comunidades e instituciones sobre las características del proyecto y los beneficios para la región y el país. iv) Mantener informada a las autoridades sobre las actividades que se desarrollan para la construcción del proyecto. v) Mantener un monitoreo de la dinámica social alrededor del territorio donde está localizado el proyecto.	Aclaraciones y ajustes al plan de inversión social Implementar planes de compensación	Alto
30	2 – Actualizar EIA para Licencia de perforaciones profundas exploratorias	Sanciones por incumplimiento regulatorio	Conformar un equipo responsable de mantener el cumplimiento de todos los requisitos normativos y regulatorios que se relacionan con las actividades técnicas, ambientales y económicas del proyecto. Tener un control sobre la calidad de los estudios exigidos por la autoridad ambiental y adelantar oportunamente los trámites ambientales para actualizar licencia ambiental mediante una adecuada asesoría jurídica	Realizar el seguimiento a la sanción	Alto
31	4 – Primera perforación profunda y restitución de vías	Sanciones por incumplimiento regulatorio	Conformar un equipo responsable de mantener el cumplimiento de todos los requisitos normativos y regulatorios que se relacionan con las actividades técnicas, ambientales y económicas del proyecto. Tener un control sobre la calidad de los estudios exigidos por la autoridad ambiental y contratar a empresas con experiencia previa en perforaciones profunda y con conocimiento de la normatividad aplicable	Realizar el seguimiento a la sanción	Alto
32	5 – Perforaciones profundas adicionales	Sanciones por incumplimiento regulatorio	Conformar un equipo responsable de mantener el cumplimiento de todos los requisitos normativos y regulatorios que se relacionan con las actividades técnicas, ambientales y económicas del proyecto. Tener un control sobre la calidad de los estudios exigidos por la autoridad ambiental y contratar a empresas con experiencia previa en perforaciones profunda y con conocimiento de la normatividad aplicable	Realizar el seguimiento a la sanción	Alto

Diseño de un modelo probabilístico para apoyar el estudio de incertidumbre y riesgo asociado a la ejecución del proyecto de Geotermia en Nereidas como ERNC en la región para CHEC S.A. E.S.P. BIC

Código del riesgo	Fase	Escenario de riesgo	Controles preventivos existentes	Controles correctivos existentes	Evaluación del control
33	5 – Perforaciones profundas adicionales	Sobrecostos o tiempos adicionales en implementaciones de controles innecesarios.	Análisis de riesgo para las perforaciones con respaldo de expertos. Contacto temprano con empresas proveedoras de este tipo de pólizas. Alianza con empresas de perforación hidrocarburos		Alto
34	General del Proyecto	Competencia con otros proyectos por recursos en los cuales la empresa tiene más experiencia (recursos humanos y financieros)	Sustentar los beneficios financieros del proyecto i) En costos: Gestionar financiación con base en logros del proyecto. ii) Capacidad de generación: Vender el proyecto como piloto para desarrollar habilidades e incursionar en la construcción de este tipo de centrales en Colombia y otros países. iii) Conveniencia: Sustentar la conveniencia de realizar los estudios de factibilidad y la toma de decisiones sobre el estudio y/o el proyecto frente a otras alternativas de inversión dadas las particularidades de esta fuente energética para EPM y el país (ventajas ambientales, creación de capacidad, diversificación de la canasta energética, ser pioneros, etc.)		Alto
35	5 – Perforaciones profundas adicionales	Sobre expectativas de la comunidad La comunidad exige mucha más inversión social que la presupuestada en el proyecto	i) Reuniones informativas oportunas con los grupos de interés (comunidades e instituciones) sobre las características del proyecto y los beneficios para la región y el país. Supuesto. Presupuesto detallado del proyecto para inversión social. ii) Visibilizar el papel de la CHEC en el liderazgo regional del proyecto. iii) Suministro de información permanente y oportuna a las comunidades e instituciones sobre las características del proyecto y los beneficios para la región y el país. iv) Mantener informada a las autoridades sobre las actividades que se desarrollan para la construcción del proyecto. v) Mantener un monitoreo de la dinámica social alrededor del territorio donde está localizado el proyecto.	Aclaraciones y ajustes al plan de inversión social implementar planes de compensación	Alto
36	4 – Primera perforación profunda y restitución de vías	Falta de credibilidad/apoyo en el proyecto por parte de las directivas de la organización	Sustentar los beneficios financieros del proyecto i) En costos: Gestionar financiación con base en logros del proyecto. ii) Capacidad de generación: Vender el proyecto como piloto para desarrollar habilidades e incursionar en la construcción de este tipo de centrales en Colombia y otros países. iii) Conveniencia: Sustentar la conveniencia de realizar los estudios de factibilidad y la toma de decisiones sobre el estudio y/o el proyecto frente a otras alternativas de inversión dadas las particularidades de esta fuente energética para EPM y el país (ventajas ambientales, creación de capacidad, diversificación de la canasta energética, ser pioneros, etc.)		Medio

Código del riesgo	Fase	Escenario de riesgo	Controles preventivos existentes	Controles correctivos existentes	Evaluación del control
37	5 – Perforaciones profundas adicionales	Falta de credibilidad/apoyo en el proyecto por parte de las directivas de la organización	Sustentar los beneficios financieros del proyecto i) En costos: Gestionar financiación con base en logros del proyecto. ii) Capacidad de generación: Vender el proyecto como piloto para desarrollar habilidades e incursionar en la construcción de este tipo de centrales en Colombia y otros países. iii) Conveniencia: Sustentar la conveniencia de realizar los estudios de factibilidad y la toma de decisiones sobre el estudio y/o el proyecto frente a otras alternativas de inversión dadas las particularidades de esta fuente energética para EPM y el país (ventajas ambientales, creación de capacidad, diversificación de la canasta energética, ser pioneros, etc.)		Medio

Nota. Elaborado por el investigador.

El grado de evaluación del control por cada riesgo considerado en el análisis se asignó partiendo de los criterios definidos en la tabla 15, y a partir de dichos criterios se obtuvieron los resultados para cada riesgo.

Tabla 16. Criterios de Nivel de los Controles de la matriz de riesgos

Criterios del Nivel de los Controles		
1	Muy Bajo	<p>Atributos</p> <p>El control se ejecuta de forma manual, su frecuencia de aplicación es esporádica, no hay responsable asignado y está sin documentar en sus componentes y/o su aplicación.</p> <ul style="list-style-type: none"> · Los controles no cumplen ningún tipo de normativa · No se presta ninguna atención al riesgo · Confiabilidad: < 30% <p>Efectividad</p> <p>Efectividad muy deficiente</p> <p>Eficacia</p> <p>Eficacia muy deficiente</p>
2	Bajo	<p>Atributos</p> <p>El control se ejecuta de forma manual o semiautomática, su frecuencia de aplicación es esporádica o periódica, hay responsable asignado sin formalizar y está deficientemente documentado en sus componentes y/o su aplicación.</p> <ul style="list-style-type: none"> · Los controles cumplen parcialmente requerimientos normativos mínimos · Atención baja al riesgo · Confiabilidad: [30% - 50%] <p>Efectividad</p> <p>Efectividad deficiente</p> <p>Eficacia</p> <p>Eficacia deficiente</p>

Diseño de un modelo probabilístico para apoyar el estudio de incertidumbre y riesgo asociado a la ejecución del proyecto de Geotermia en Nereidas como ERNC en la región para CHEC S.A. E.S.P. BIC

Criterios del Nivel de los Controles			
3	Medio	Atributos	El control se ejecuta de forma semiautomática, su frecuencia de aplicación es periódica, hay responsable asignado sin formalizar y está parcialmente documentado en sus componentes y/o su aplicación.
			· Los controles cumplen requerimientos normativos mínimos
			· Atención moderada al riesgo
			· Confiabilidad: [50% - 70%]
	Efectividad	Efectividad moderada	
	Eficacia	Eficacia moderada	
4	Alto	Atributos	El control se ejecuta de forma semiautomática o sistematizada, su frecuencia de aplicación es periódica o continua, hay responsable asignado formalmente y está cerca de documentarse completamente en sus componentes y/o su aplicación.
			· Atención significativa al riesgo
			· Se han implementado los controles desde la perspectiva Costo/ Beneficio
			· Confiabilidad : [70% - 95%]
	Efectividad	Alta efectividad	
	Eficacia	Alta eficacia	
5	Muy Alto	Atributos	El control se ejecuta de forma sistematizada, su frecuencia de aplicación es continua, tiene responsable asignado formalmente, está completamente documentado en sus componentes y se documenta su aplicación.
			· Redundancia de controles
			· Aplicación de mejores prácticas
			· Confiabilidad: $\geq 95\%$
	Efectividad	Muy alta efectividad	
	Eficacia	Muy alta eficacia	

Nota. Elaborado por el investigador.

Evaluación de riesgos

Para analizar cada escenario de riesgo, de los (37) escenarios concertados anteriormente, el primer paso es seleccionar los objetos de impacto que se afectan con la materialización del riesgo de acuerdo con los efectos identificados. Cuando hay varios objetos de impacto que se pueden ver involucrados, estos se deben identificar, y se selecciona aquel que se afecta en mayor medida, el cual se denomina objeto de impacto relevante. Sobre el objeto de impacto relevante se evaluará la consecuencia del escenario de riesgo de acuerdo con la tabla de valoración aplicable. Una vez identificados los objetos de impacto que se pueden afectar y el objeto de impacto relevante, se

procede a calificar el escenario en su probabilidad y consecuencia, teniendo en cuenta los controles existentes.

Los objetos de impacto adoptados para el análisis son, en su orden:

Costo/recurso financiero: Se refiere al impacto en la materialización de escenarios de riesgo que modifiquen los valores económicos planteados en el flujo de caja del proyecto, previo al cierre financiero.

Tiempo: Se refiere al impacto en la materialización de escenarios de riesgo que modifiquen los tiempos del cronograma del proyecto o hitos predecesores en la culminación del mismo.

Personas. Se refiere al impacto que la materialización de un riesgo puede tener por la falta de gestión del talento humano a raíz de no disponer de los conocimientos, destrezas, habilidades, talentos y know-how requeridos para desarrollar las actividades requeridas por la estrategia. No contar con las habilidades administrativas para aprovechar y capitalizar el talento humano en pro del logro de los objetivos empresariales.

Reputación. Se refiere al impacto que un riesgo puede tener en aspectos tales como confianza y credibilidad en los compromisos de CHEC.

Ambiental. Se refiere al impacto que se puede tener en las condiciones ambientales en las cuales se desarrollan las actividades del nivel de gestión analizado.

Información. Describe el impacto que la materialización de un riesgo puede tener en la disponibilidad, confidencialidad e integridad de la información que administra o modifica el nivel de gestión analizado.

Calidad. Describe las consecuencias que la materialización de un riesgo puede tener en la capacidad del nivel de gestión analizado, de cumplir con el objetivo del producto o servicio que administra o que es resultado de sus actividades.

Probabilidad de ocurrencia del riesgo. Según la disponibilidad de información histórica respecto al riesgo analizado, o con base en el conocimiento y experiencia, se procede a calificar la probabilidad de ocurrencia de cada escenario de riesgo de acuerdo con los criterios que se detallan en el anexo 3, que contiene la tabla de evaluación de la probabilidad de ocurrencia del riesgo descritos.

Consecuencia. La consecuencia sobre el objeto de impacto relevante se califica según la disponibilidad de información histórica respecto al riesgo analizado, o con base en el conocimiento y la experiencia. Esto de acuerdo con los criterios definidos en los anexos 4, 5 y 6, que contienen las tablas para la valoración de las consecuencias por objeto de impacto.

Cálculo del nivel de riesgo. Una vez definida la probabilidad y la consecuencia para los 37 riesgos, se procede a calcular el nivel de riesgo como el producto entre ambas. Para el cálculo es importante tener en cuenta que cada elemento de la probabilidad y la consecuencia tienen un valor asociado. Para el caso de la probabilidad los valores obedecen a un patrón lineal con uno (1) como mínimo y cinco (5) como máximo. Para la consecuencia el patrón es exponencial con uno (1) como mínimo y dieciséis (16) como máximo. Este último patrón se define con el objeto de darle mayor preponderancia a la consecuencia del riesgo al momento de evaluarlo, obteniendo la Matriz de Riesgos, representada en la Tabla 18.

Tabla 17 *Matriz de riesgos*

PROBABILIDAD		CONSECUENCIA				
		Mínima	Menor	Moderada	Mayor	Máxima
		1	2	4	8	16
Muy alta	5					
Alta	4				6	1
Media	3		34	24	7,8,9,10,11,12,13,14,15	2,3
Baja	2	36,37		29,30,31,32,33	18,19,20,21,22,23	4,5
Muy baja	1			35	25,26,27,28	16,17

Nota. Elaborado por el investigador. Base metodológica CHEC S.A E.S.P.

3.2.2 *Matriz de riesgos*

Representa gráficamente los riesgos identificados según su nivel de riesgo individual. De acuerdo con la clasificación de los 37 riesgos por nivel de criticidad, se identifican 6 extremos y 17 altos, los cuales están dando como resultado las posibles consecuencias en la exploración y perforación de geotermia en caso de no gestionar los riesgos.

Tabla 18. *Cantidad de Riesgos por criticidad*

Cantidad de riesgos	
Extremo	6
Alto	17
Tolerable	11
Aceptable	3
Total riesgos	37

Nota. Elaborado por el investigador. Base metodológica CHEC S.A E.S.P.

Tabla 19. *Índice de Riesgo*

Índice de riesgo	
Suma riesgos individuales	698
Número de riesgos	37
Índice de riesgo	0,618 Alto

Escala de evaluación

Diseño de un modelo probabilístico para apoyar el estudio de incertidumbre y riesgo asociado a la ejecución del proyecto de Geotermia en Nereidas como ERNC en la región para CHEC S.A. E.S.P. BIC

0,37	0,00	Bajo
0,53	0,37	Medio
0,67	0,53	Alto
1,00	0,67	Muy alto

Nota. Elaborado por el investigador. Base metodológica CHEC S.A E.S.P.

3.2.3 Nivel de riesgos

El índice o nivel de riesgo es un valor numérico entre cero (0) y uno (1), que se calcula para el nivel de cometido en el análisis (en términos de la probabilidad y consecuencia), de cada uno de los riesgos descritos. Este nivel se plantea con dos objetivos: resumir en un único valor el riesgo general del nivel de gestión analizado, donde los valores más altos representan mayor riesgo y; facilitar el seguimiento a la evolución de dichos valores (ver anexo 3, evaluación probabilidad ocurrencia del riesgo).

Para el caso de estudio, el índice de riesgo proyectó un valor de 0,618 en la escala (tabla 18); es decir, “Alto” por las implicaciones que tiene para CHEC S.A. E.S.P. las incertidumbres del proceso de exploración y perforación geotérmica.

El escenario de riesgos, cuyo resultado se observa en la tabla 12, muestra un nivel de riesgo entre “Alto” y “Extremo” para veintitrés (23) de los treinta y siete (37) riesgos incluidos en el análisis.

Según se aprecia en la tabla 19, en veintiocho (28) casos la consecuencia se considera “Mayor” ó “Máxima”, por los resultados adversos que pueden presentarse en lo técnico, económico, ambiental y social, por efectos derivados de la gestión, en aspectos técnicos, operativos, de explorar y perforar para el proyecto geotérmico.

Tabla 20. Nivel de riesgo a partir de la probabilidad y la consecuencia

Código del riesgo	Fase	Escenario de riesgo	Probabilidad	Consecuencia	Nivel de Riesgo
1	2 – Actualizar EIA para Licencia de perforaciones profundas exploratorias	Demoras en el otorgamiento de la licencia	Alta	Máxima	Extremo
2	5 – Perforaciones profundas adicionales	Bajo potencial geotérmico que haga inviable el proyecto después de la primera perforación.	Media	Máxima	Extremo
3	2 – Actualizar EIA para Licencia de perforaciones profundas exploratorias	No obtención de permisos / licencias / otras aprobaciones regulatorias para el proyecto (ej.: permisos ambientales)	Media	Máxima	Extremo
4	2 – Actualizar EIA para Licencia de perforaciones profundas exploratorias	Cambios en las especificaciones para los diseños de infraestructura y sitios de perforación, que implican modificaciones al EIA	Baja	Máxima	Extremo
5	3 – Diseños detallado de pozos	Selección equivocada de un contratista para el diseño de pozos o con especificaciones insuficientes	Baja	Máxima	Extremo
6	General del Proyecto	Cambios en el personal clave del proyecto	Alta	Mayor	Extremo
7	1 - Identificar sitios de perforación	Fallas/ deficiencias en los estudios geo científicos	Media	Mayor	Alto
8	4 – Primera perforación profunda y restitución de vías	Decisiones equivocadas ante imprevistos durante la perforación	Media	Mayor	Alto
9	2 – Actualizar EIA para Licencia de perforaciones profundas exploratorias	Oposición al desarrollo del proyecto por parte de los grupos de interés (comunidad, ONG)	Media	Mayor	Alto
10	2 – Actualizar EIA para Licencia de perforaciones profundas exploratorias	Interferencia de proyectos, implica competir por el otorgamiento de licencia para un recurso común	Media	Mayor	Alto
11	General del Proyecto	Fallas en los supuestos para la modelación financiera	Media	Mayor	Alto
12	4 – Primera perforación profunda y restitución de vías	Retraso en la consecución de recursos financieros	Media	Mayor	Alto
13	4 – Primera perforación profunda y restitución de vías	Conflictos con el perforador ante incumplimientos o fallas en la perforación.	Media	Mayor	Alto
14	5 – Perforaciones profundas adicionales	Conflictos con el perforador ante incumplimientos o fallas en la perforación.	Media	Mayor	Alto

Diseño de un modelo probabilístico para apoyar el estudio de incertidumbre y riesgo asociado a la ejecución del proyecto de Geotermia en Nereidas como ERNC en la región para CHEC S.A. E.S.P. BIC

Código del riesgo	Fase	Escenario de riesgo	Probabilidad	Consecuencia	Nivel de Riesgo
15	1 - Identificar sitios de perforación	Dudas en Planeación Generación sobre no contar con la información suficiente para tomar decisiones para perforar	Media	Mayor	Alto
16	4 – Primera perforación profunda y restitución de vías	Riesgos inherentes a la actividad de perforación del pozo (explosión, incendio, colapso, gases tóxicos, rotura de tubería de perforación, retrasos).	Muy baja	Máxima	Alto
17	5 – Perforaciones profundas adicionales	Riesgos inherentes a la actividad de perforación del pozo (explosión, incendio, colapso, gases tóxicos, rotura de tubería de perforación, retrasos).	Muy baja	Máxima	Alto
18	General del Proyecto	Condicionamiento del diseño y construcción de pozos con el mismo contratista, implicando posibles sobre costos (por conflicto de intereses). Nota. Aunque no es obligatorio que el diseño y construcción sea con el mismo contratista, se disminuyen los riesgos en la interpretación e implementación de la construcción si el diseñador coincide con el constructor.	Baja	Mayor	Alto
19	5 – Perforaciones profundas adicionales	Decisiones equivocadas ante imprevistos durante la perforación	Baja	Mayor	Alto
20	4 – Primera perforación profunda y restitución de vías	Condiciones físicas desfavorables no previstas durante la perforación. Fallar en la perforación del pozo (desvíos no planeados, no encontrar el recurso, encontrar impermeabilidad, no alcanzar presiones deseadas)	Baja	Mayor	Alto
21	5 – Primera perforación profunda y restitución de vías	Condiciones físicas desfavorables no previstas durante la perforación. Fallar en la perforación del pozo (desvíos no planeados, no encontrar el recurso, encontrar impermeabilidad, no alcanzar presiones deseadas)	Baja	Mayor	Alto
22	4 – Primera perforación profunda y restitución de vías	No consecución de recursos por terceros que faciliten la decisión de invertir en perforaciones (recursos BID, NAMA, etc.)	Baja	Mayor	Alto

Código del riesgo	Fase	Escenario de riesgo	Probabilidad	Consecuencia	Nivel de Riesgo
23	5 – Perforaciones profundas adicionales	No consecución de recursos por terceros que faciliten la decisión de invertir en perforaciones (recursos BID, NAMA, etc.)	Baja	Mayor	Alto
24	General del Proyecto	Demoras en la toma de decisiones dentro del proyecto o de la organización con respecto al proyecto	Media	Moderada	Tolerable
25	5 – Perforaciones profundas adicionales	Actividad volcánica y/o sísmica adversa al proyecto (afectando la infraestructura existente para pozos y accesos) Nota. El riesgo se presenta en cualquier etapa y se deja la más crítica	Muy baja	Mayor	Tolerable
26	4 – Primera perforación profunda y restitución de vías	Hallazgos arqueológicos durante la ejecución del proyecto. Nota. Se puede presentar en varias etapas del proyecto	Muy baja	Mayor	Tolerable
27	4 – Primera perforación profunda y restitución de vías	Afectación negativa a los recursos naturales (flora, fauna, aguas) como consecuencia de la ejecución del proyecto	Muy baja	Mayor	Tolerable
28	4 – Primera perforación profunda y restitución de vías	Dificultad en la obtención de la servidumbre de terreno o permiso de uso del mismo para las perforaciones por parte de los propietarios	Muy baja	Mayor	Tolerable
29	4 – Primera perforación profunda y restitución de vías	Sobre expectativas de la comunidad La comunidad exige mucha más inversión social que la presupuestada en el proyecto	Baja	Moderada	Tolerable
30	2 – Actualizar EIA para Licencia de perforaciones profundas exploratorias	Sanciones por incumplimiento regulatorio	Baja	Moderada	Tolerable
31	4 – Primera perforación profunda y restitución de vías	Sanciones por incumplimiento regulatorio	Baja	Moderada	Tolerable
32	5 – Perforaciones profundas adicionales	Sanciones por incumplimiento regulatorio	Baja	Moderada	Tolerable
33	5 – Perforaciones profundas adicionales	Sobrecostos o tiempos adicionales en implementaciones de controles innecesarios.	Baja	Moderada	Tolerable
34	General del Proyecto	Competencia con otros proyectos por recursos en los cuales la empresa tiene más experiencia (recursos humanos y financieros)	Media	Menor	Tolerable

Diseño de un modelo probabilístico para apoyar el estudio de incertidumbre y riesgo asociado a la ejecución del proyecto de Geotermia en Nereidas como ERNC en la región para CHEC S.A. E.S.P. BIC

Código del riesgo	Fase	Escenario de riesgo	Probabilidad	Consecuencia	Nivel de Riesgo
35	5 – Perforaciones profundas adicionales	Sobre expectativas de la comunidad La comunidad exige mucha más inversión social que la presupuestada en el proyecto	Muy baja	Moderada	Aceptable
36	4 – Primera perforación profunda y restitución de vías	Falta de credibilidad/apoyo en el proyecto por parte de las directivas de la organización	Baja	Mínima	Aceptable
37	5 – Perforaciones profundas adicionales	Falta de credibilidad/apoyo en el proyecto por parte de las directivas de la organización	Baja	Mínima	Aceptable

Nota. Elaborado por el investigador. Base metodológica CHEC S.A E.S.P.

A partir de estos resultados el tratamiento del riesgo implica identificar las acciones potenciales que se deben realizar para tratar los riesgos, iniciando por los controles existentes que fueron considerados durante la evaluación de los riesgos, y teniendo en cuenta esta base se identifican los trabajos faltantes que son importantes para mitigar los riesgos examinados. Con este tratamiento se busca, entre otros aspectos, mejorar controles y diseñar otros controles cuya eficacia pueda tener mejores resultados.

De manera determinística y acertada podemos intuir aquellos riesgos que representan un nivel elevado y trabajar para que se mitigue parcialmente o totalmente en los efectos del proyecto, sin embargo, en el siguiente capítulo se pretende de manera probabilística destacar aquellos escenarios de riesgo con mayor probabilidad de incidencia y que agreguen valor en la toma de decisiones de la planeación y ejecución del proyecto de geotermia, tomando como base estos resultados.

4 Modelo probabilístico proyecto Geotermia Valle Nereidas

En este capítulo, se amplían las características y resultados determinísticos presentados anteriormente mediante un modelo que facilita la toma de decisiones al proporcionar resultados probabilísticos. Este enfoque permite que la organización CHEC S.A. E.S.P. comprenda de manera más efectiva las incertidumbres técnicas en las fases de exploración, perforación y generación de energía, así como las incertidumbres en las áreas de exploración, y los aspectos económicos, ambientales, jurídicos y sociales.

Basados en los análisis del capítulo 3 y al utilizar la Figura 12 como referencia, se implementa un modelo simple con simulación de Montecarlo. Este método se elige por su versatilidad, flexibilidad y fácil comprensión en la simulación de incertidumbres. A continuación, se definen las variables de entrada, utilizando los resultados determinísticos como base para el caso de estudio. Cada estimación se realiza considerando las características específicas del proyecto geotérmico y la información disponible y permitida dentro de los límites de confidencialidad del proyecto en desarrollo.

Adicionalmente, se asignan distribuciones probabilísticas a las variables de entrada. Esto se realiza con el objetivo de analizar diversos escenarios de evaluación, teniendo en cuenta la limitada disponibilidad de información en CHEC S.A. E.S.P. y en Colombia en general, en lo que respecta al desarrollo y estimación de recursos para proyectos de generación a partir de la fuente renovable geotérmica. Las distribuciones probabilísticas utilizadas incluyen la distribución normal, distribución uniforme, distribución triangular, distribución PERT y distribución Bernoulli. En el caso de las variables de CAPEX, se asigna una distribución PERT, basándose en análisis de bases de datos históricas y tomando como referencia las estimaciones de diferentes autores para asignar distribuciones probabilísticas a estas variables

Diseño de un modelo probabilístico para apoyar el estudio de incertidumbre y riesgo asociado a la ejecución del proyecto de Geotermia en Nereidas como ERNC en la región para CHEC S.A. E.S.P. BIC

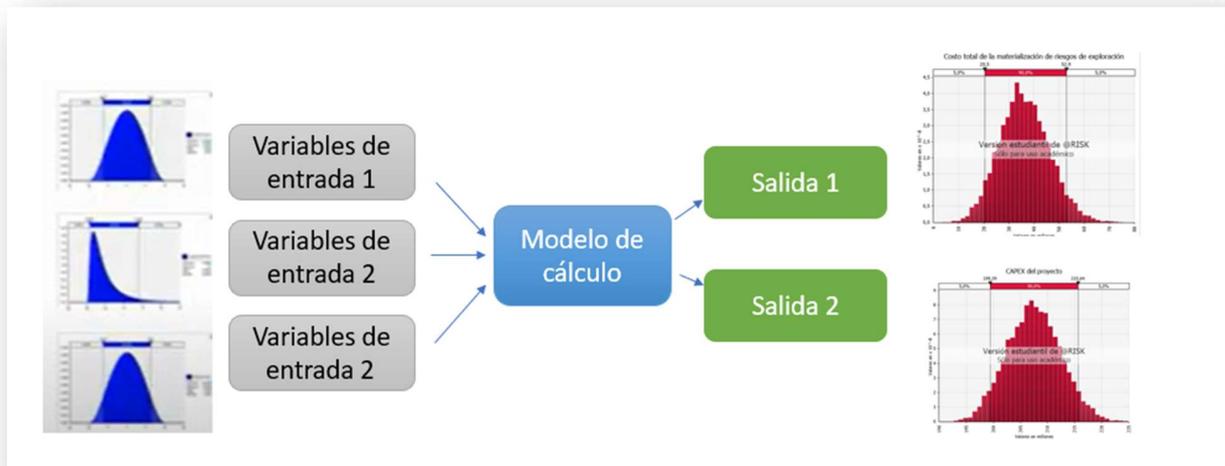


Figura 12. Modelo simple con simulación de Montecarlo. .Nota. Elaborado por el investigador.

4.1 Análisis Probabilístico Matriz De Riesgos

En el análisis de los escenarios de riesgos asociados a la exploración y perforación de fuentes geotérmicas como materia prima para la generación de energía, previamente examinado en el capítulo anterior, se determina un nivel de riesgo resultante de la multiplicación de la probabilidad por la consecuencia. Inicialmente, se asignan probabilidades calificadas como muy baja, baja, media, alta y muy alta en el esquema determinístico a cada escenario de riesgo en la matriz.

Luego, para dimensionar estas probabilidades, se utiliza una distribución de probabilidad tipo Bernoulli, que es de tipo discreta. Se asigna un valor cuantitativo a cada probabilidad de ocurrencia del evento binomial (1) o no ocurrencia (0), de acuerdo con una calificación porcentual específica dada en cada escenario de riesgo. La probabilidad dentro de la metodología se define a partir de un intervalo de porcentajes, y se toma la marca de clase de este intervalo como el valor cuantitativo asociado.

Tabla 21 Distribución de Probabilidad de Ocurrencia

Clasificación	Probabilidad de ocurrencia	Descripción
Muy alta	Mayor del 85%	Muy alta probabilidad de ocurrencia
Alta	60.1% - 85%	Alta probabilidad de ocurrencia
Media	25.1% - 60%	Mediana probabilidad de ocurrencia
Baja	5.1% - 25%	Baja probabilidad de ocurrencia
Muy baja	Menor o igual al 5%	Es casi imposible que ocurra

Nota. Elaborado por el investigador

Seguidamente por las consecuencias o impactos en el análisis determinístico se analizaba como mínima, menor, moderada, mayor, máxima se modelan bajo una distribución de probabilidad tipo PERT con tres (3) tipos de escenarios mínimo, más probable y máximo, de acuerdo al riesgo que se materialice en costos, tiempo o alcance del proyecto, para este efecto se simula que aunque los objetos de impactos relevantes pueden materializar el tiempo del proyecto, costos del proyecto, alcance técnico del proyecto, personas, reputación, ambiental, social, entre otros, se asume en el modelo que cualquier escenario se materializará en costos adicionales para el proyecto. La escala se define como un porcentaje del valor del proyecto. Se sugiere inicialmente entre un 10% - 20% del valor del proyecto para la clasificación máxima. Esta matriz definió 15% para el proyecto de exploración y perforación inicial según indican los autores.

Tabla 22 Parámetros Sugeridos de Impacto

Parámetros sugeridos para costo/recurso financiero

Criterios	Evaluación			
	Costo		mínimo	máximo
Máxima	15%		3.750.000	
Mayor	8%	15%	1.875.000	3.750.000
Moderada	3,8%	8%	937.500	1.875.000
Menor	1,88%	3,8%	468.750	937.500
Mínima		1,88%		468.750

Diseño de un modelo probabilístico para apoyar el estudio de incertidumbre y riesgo asociado a la ejecución del proyecto de Geotermia en Nereidas como ERNC en la región para CHEC S.A. E.S.P. BIC

Nota. Elaborado por el investigador

Los valores proporcionados en el cuadro anterior son ficticios debido a la confidencialidad de algunos elementos del proyecto, pero se presentan para ilustrar la metodología utilizada.

Posteriormente, se lleva a cabo una simulación Monte Carlo, que efectúa el análisis de riesgos mediante la creación de modelos de posibles resultados. Esto se logra sustituyendo un rango de valores, tomando las distribuciones de probabilidad asignadas (tanto para probabilidad como para impacto) a cualquier factor con incertidumbre inherente. Para los 37 escenarios de riesgo, se describe a continuación una de las muestras aleatorias, tomada de las 10,000 consideradas en el análisis.

Tabla 23 Muestra Aleatoria de Escenarios de Riesgo con Probabilidad

Código del riesgo	Escenario de riesgo	Objeto de impacto relevante	Nivel de Riesgo inicial (Fecha)	Probabilidad	Ocurre?	Impacto			Valor	Valor si ocurre
						Mínimo	Más probable	Máximo		
1	Demoras en el otorgamiento de la licencia	Tiempo	Extremo	73%	1	3.000.000	5.000.000	10.000.000	6.083.689	6.083.689
2	Bajo potencial geotérmico que haga inviable el proyecto después de la primera	Costo / Recurso financiero	Extremo	43%	0	3.000.000	5.000.000	10.000.000	6.131.543	-
3	No obtención de permisos / licencias / otras aprobaciones regulatorias para el proyecto (ej.: permisos ambientales)	Costo / Recurso financiero	Extremo	43%	0	3.000.000	5.000.000	10.000.000	5.615.291	-
4	Cambios en las especificaciones para los diseños de infraestructura y sitios de perforación, que implican modificaciones al EIA	Tiempo	Extremo	15%	0	3.000.000	5.000.000	10.000.000	4.282.907	-
5	Selección equivocada de un contratista para el diseño de pozos o con especificaciones insuficientes	Tiempo	Extremo	15%	0	3.000.000	5.000.000	10.000.000	4.995.134	-
6	Cambios en el personal clave del proyecto	Tiempo	Extremo	73%	1	2.400.000	4.000.000	5.000.000	4.338.562	4.338.562
7	Fallas/ deficiencias en los estudios geocientíficos	Costo / Recurso financiero	Alto	43%	0	2.400.000	4.000.000	5.000.000	3.288.391	-
8	Decisiones equivocadas ante imprevistos durante la perforación	Tiempo	Alto	43%	1	2.400.000	4.000.000	5.000.000	2.875.869	2.875.869
9	Oposición al desarrollo del proyecto por parte de de los grupos de interes (comunidad, ONG)	Tiempo	Alto	43%	1	2.400.000	4.000.000	5.000.000	3.456.007	3.456.007
10	Interferencia de proyectos, implica competir por el otorgamiento de licencia para un recurso común	Costo / Recurso financiero	Alto	43%	0	2.400.000	4.000.000	5.000.000	3.267.305	-
11	Fallas en los supuestos para la modelación financiera	Costo / Recurso financiero	Alto	43%	0	2.400.000	4.000.000	5.000.000	4.466.988	-
12	Retraso en la consecución de recursos financieros	Costo / Recurso financiero	Alto	43%	0	2.400.000	4.000.000	5.000.000	4.641.993	-

Código del riesgo	Escenario de riesgo	Objeto de impacto relevante	Nivel de Riesgo inicial (Fecha)	Probabilidad	Ocurre?	Impacto			Valor	Valor si ocurre
						Minimo	Mas probable	Maximo		
13	Conflictos con el perforador ante incumplimientos o fallas en la perforación.	Tiempo	Alto	43%	1	2.400.000	4.000.000	5.000.000	4.402.924	4.402.924
14	Conflictos con el perforador ante incumplimientos o fallas en la perforación.	Tiempo	Alto	43%	1	2.400.000	4.000.000	5.000.000	2.928.274	2.928.274
15	Dudas en Planeación Generación sobre no contar con la información suficiente para tomar decisiones para	Costo / Recurso financiero	Alto	43%	1	2.400.000	4.000.000	5.000.000	4.280.481	4.280.481
16	Riesgos inherente a la actividad de perforación del pozo (explosión, incendio, colapso, gases tóxicos, rotura de tubería de perforación,	Costo / Recurso financiero	Alto	5%	0	3.000.000	5.000.000	10.000.000	4.694.505	-
17	Riesgos inherente a la actividad de perforación del pozo (explosión, incendio, colapso, gases tóxicos, rotura de tubería de perforación,	Costo / Recurso financiero	Alto	5%	0	3.000.000	5.000.000	10.000.000	4.458.413	-
18	Condicionamiento del diseño y construcción de pozos con el mismo contratista, implicando posibles sobre costos (por conflicto de intereses). Nota. Aunque no es obligatorio que el diseño y construcción sea con el mismo contratista, se disminuyen los riesgos en la interpretación e implementación de la construcción si el diseñador	Costo / Recurso financiero	Alto	15%	0	2.400.000	4.000.000	5.000.000	4.590.017	-
19	Decisiones equivocadas ante imprevistos durante la perforación	Tiempo	Alto	15%	0	2.400.000	4.000.000	5.000.000	3.911.521	-

Código del riesgo	Escenario de riesgo	Objeto de impacto relevante	Nivel de Riesgo inicial (Fecha)	Probabilidad	Ocurre?	Impacto			Valor	Valor si ocurre
						Minimo	Mas probable	Maximo		
20	Condiciones físicas desfavorables no previstas durante la perforación. Fallar en la perforación del pozo (desvíos no planeados, no encontrar el recurso, encontrar impermeabilidad, no alcanzar presiones deseadas)	Costo / Recurso financiero	Alto	15%	0	2.400.000	4.000.000	5.000.000	3.332.382	-
21	Condiciones físicas desfavorables no previstas durante la perforación. Fallar en la perforación del pozo (desvíos no planeados, no encontrar el recurso, encontrar impermeabilidad, no alcanzar presiones deseadas) (recomendamos borrar esta fila, porque es exactamente igual al riesgo anterior 22)	Costo / Recurso financiero	Alto	15%	0	2.400.000	4.000.000	5.000.000	3.914.940	-
22	No consecución de recursos por terceros que faciliten la decisión de invertir en perforaciones (recursos BID,	Tiempo	Alto	15%	0	2.400.000	4.000.000	5.000.000	4.466.470	-
23	No consecución de recursos por terceros que faciliten la decisión de invertir en perforaciones (recursos BID,	Tiempo	Alto	15%	1	2.400.000	4.000.000	5.000.000	4.292.837	4.292.837
24	Demoras en la toma de decisiones dentro del proyecto o de la organización con respecto al proyecto	Tiempo	Tolerable	43%	0	1.920.000	3.200.000	4.000.000	3.459.604	-
25	Actividad volcánica y/o sísmica adversa al proyecto (afectando la infraestructura existente para pozos y accesos) Nota. El riesgo se presenta en cualquier etapa y se deja la más crítica	Costo / Recurso financiero	Tolerable	5%	0	2.400.000	4.000.000	5.000.000	4.256.820	-
26	Hallazgos arqueológicos durante la ejecución del proyecto. Nota. Se puede presentar en varias etapas del proyecto (en otros riesgos, a pesar de que sucedan en diferentes etapas las consecuencias o probabilidades cambian y por esa razón los incluimos en dos filas diferentes, sin embargo creemos que este riesgo tendría	Tiempo	Tolerable	5%	0	2.400.000	4.000.000	5.000.000	4.055.438	-

Diseño de un modelo probabilístico para apoyar el estudio de incertidumbre y riesgo asociado a la ejecución del proyecto de Geotermia en Nereidas como ERNC en la región para CHEC S.A. E.S.P. BIC

Código del riesgo	Escenario de riesgo	Objeto de impacto relevante	Nivel de Riesgo inicial (Fecha)	Probabilidad	Ocurre?	Impacto			Valor	Valor si ocurre
						Mínimo	Más probable	Máximo		
27	Afectación negativa a los recursos naturales (flora, fauna, aguas) como consecuencia de la ejecución	Ambiente	Tolerable	5%	0	2.400.000	4.000.000	5.000.000	4.050.755	-
28	Dificultad en la obtención de la servidumbre de terreno o permiso de uso del mismo para las perforaciones por parte de los propietarios	Tiempo	Tolerable	5%	0	2.400.000	4.000.000	5.000.000	4.619.111	-
29	Sobreexpectativas de la comunidad La comunidad exige mucha más inversión social que la presupuestada en el proyecto	Tiempo	Tolerable	15%	0	1.920.000	3.200.000	4.000.000	2.799.295	-
30	Sanciones por incumplimiento regulatorio	Tiempo	Tolerable	15%	0	1.920.000	3.200.000	4.000.000	3.005.830	-
31	Sanciones por incumplimiento regulatorio	Tiempo	Tolerable	15%	0	1.920.000	3.200.000	4.000.000	2.932.832	-
32	Sanciones por incumplimiento regulatorio	Tiempo	Tolerable	15%	0	1.920.000	3.200.000	4.000.000	2.601.210	-
33	Sobrecostos o tiempos adicionales en implementaciones de controles	Costo / Recurso financiero	Tolerable	15%	0	1.920.000	3.200.000	4.000.000	2.985.526	-
34	Competencia con otros proyectos por recursos en los cuales la empresa tiene más experiencia (recursos humanos y financieros)	Costo / Recurso financiero	Tolerable	43%	0	384.000	640.000	3.200.000	1.070.198	-
35	Sobreexpectativas de la comunidad La comunidad exige mucha más inversión social que la presupuestada en el proyecto	Tiempo	Aceptable	5%	1	1.920.000	3.200.000	4.000.000	2.722.013	2.722.013
36	Falta de credibilidad/apoyo en el proyecto por parte de las directivas de la organización	Tiempo	Aceptable	15%	0	38.400	64.000	640.000	90.692	-
37	Falta de credibilidad/apoyo en el proyecto por parte de las directivas de la organización	Tiempo	Aceptable	15%	0	38.400	64.000	640.000	279.466	-
Total									42.488.964	

Nota. Elaborado por el investigador

Luego, calcula los resultados una y otra vez, cada vez usando un grupo diferente de valores aleatorios de las funciones de probabilidad, esto para 10.000 iteraciones en esta simulación. Dependiendo del número de incertidumbres y de los rangos especificados, para completar una simulación Monte Carlo puede ser necesario realizar miles o decenas de miles de recálculos. La simulación Monte Carlo produce distribuciones de valores de los resultados posibles. El resultado de la simulación arrojó los siguientes resultados.

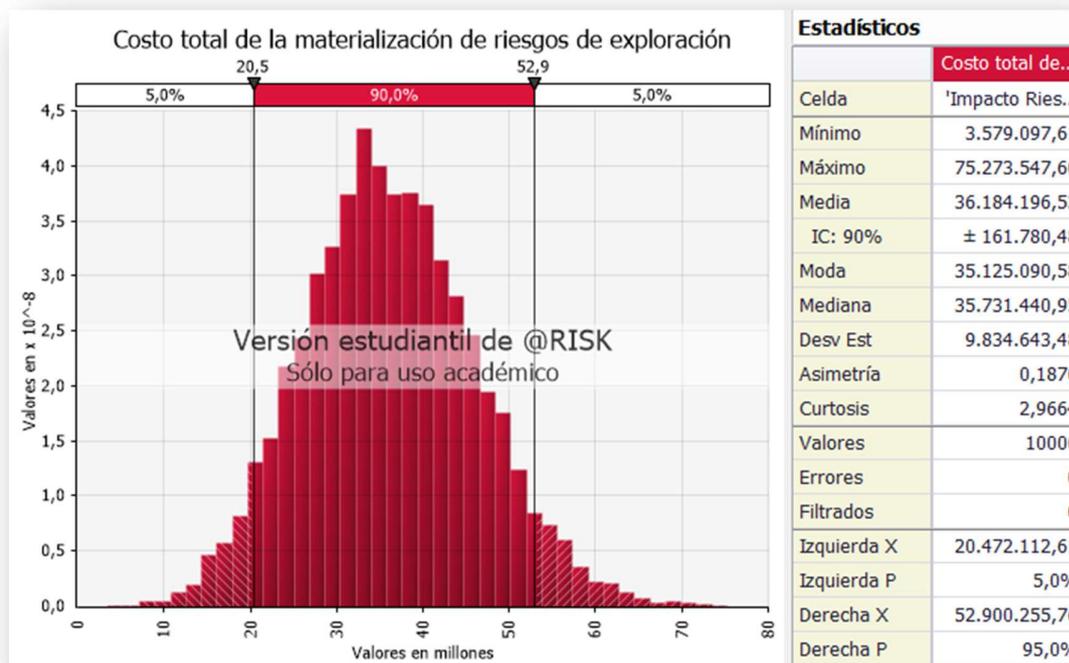


Figura 13. Costo Total de Materialización de Riesgos. Nota. Elaborado por el investigador con Software @risk.

Los resultados anteriores reflejan el impacto en términos económicos de la materialización de riesgos. Técnicamente, muestran lo que ocurriría si no se gestionan los 37 escenarios de riesgo de la matriz principal. En otras palabras, no gestionar los riesgos de exploración técnica, legal, ambiental, social, entre otros, tiene una probabilidad, según la campana de Gauss, de aumentar el valor del proyecto en un rango entre USD 20,5 MMDD (con una probabilidad del 95% de ocurrencia) y USD 52,9 MMDD (con una probabilidad del 5% de ocurrencia). Este es un rango amplio y un valor económico significativo, considerando que la materialización de riesgos podría poner en peligro la viabilidad del proyecto geotérmico.

No obstante, en la búsqueda de la gestión de proyectos de energía geotérmica y la gestión de riesgos, pilares fundamentales en la construcción de un proyecto eléctrico, un análisis de varianzas revela que hay escenarios que tienen una mayor prioridad debido al impacto que tienen

Diseño de un modelo probabilístico para apoyar el estudio de incertidumbre y riesgo asociado a la ejecución del proyecto de Geotermia en Nereidas como ERNC en la región para CHEC S.A. E.S.P. BIC

en los resultados finales. Esto se debe a que ocho (8) de los treinta y siete (37) escenarios de riesgo analizados contribuyen al 50% de las varianzas totales. Para obtener más detalles sobre los riesgos de exploración y sus respectivas varianzas, se muestra la siguiente figura.

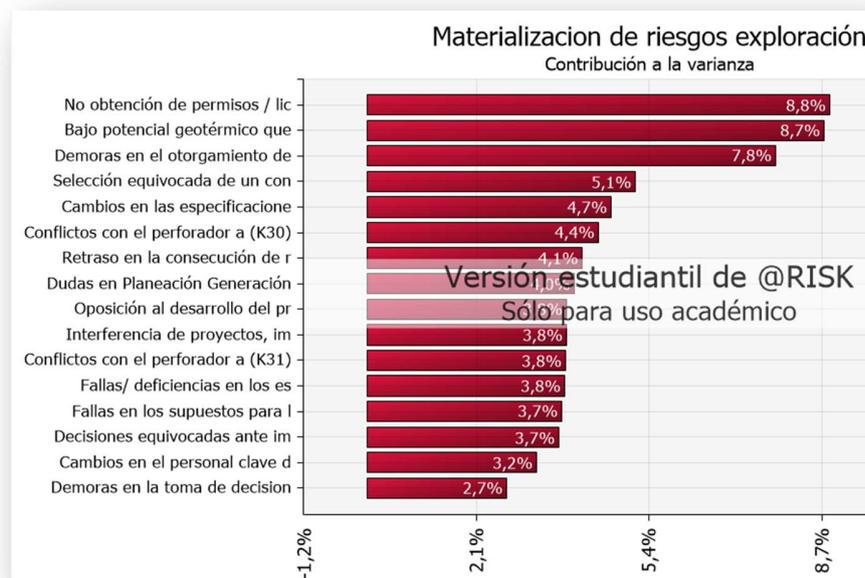


Figura 14. Riesgos de Exploración varianza. Nota. Elaborado por el investigador con Software @risk.

Los escenarios de riesgo que deberían tener una atención y control más específico en su orden son:

- i) No obtención de permisos / licencias / otras aprobaciones regulatorias para el proyecto,
- ii) Bajo potencial geotérmico que haga inviable el proyecto después de la primera perforación,
- iii) Demoras en el otorgamiento de la licencia; estas primeras aportan en la varianza el 25,3% de los resultados finales; a continuación los escenarios de riesgo:
- iv) selección equivocada de un contratista para el diseño de pozos o con especificaciones insuficientes (con 5.1%),
- v) cambios en las especificaciones para los diseños de infraestructura y sitios de perforación, que implican

modificaciones al EIA (con 4.7%), vi) conflictos con el perforador ante incumplimientos o fallas en la perforación (con 4.4%), vii) retraso en la consecución de recursos financieros (con 4,1%), viii) dudas en planeación generación sobre no contar con la información suficiente para tomar decisiones para perforar (con 4%), completan los (8) ocho escenarios de riesgos de mayor aporte a un posible sobrecosto por materialización de riesgos. Gestionar estos escenarios con mayor detalle, respecto de los restantes escenarios de riesgo puede mitigar de mejor manera los inconvenientes técnicos, económicos, ambientales, legales, entre otros.

4.2 Análisis Probabilístico de Variables Determinísticas del Proyecto Nereidas.

Se consideran para la siguiente validación del modelo probabilístico, para el presente estudio, las variables técnicas, económicos/financieros, ambientales, políticos/legales y socioculturales, ordenados respectivamente del factor de mayor a menor admisión en la literatura de evaluación de proyectos y de energía geotérmica según fue concluido en el capítulo 3.1.1. A continuación, se resume cada uno de ellos describiendo su concepto, con una distribución de probabilidad triangular (que analiza probabilidades teniendo en cuenta tres escenarios más probable, optimista y pesimista) cuyo alcance e importancia fue usado en el modelo determinístico para el proyecto geotérmico Valle de Nereidas

Diseño de un modelo probabilístico para apoyar el estudio de incertidumbre y riesgo asociado a la ejecución del proyecto de Geotermia en Nereidas como ERNC en la región para CHEC S.A. E.S.P. BIC

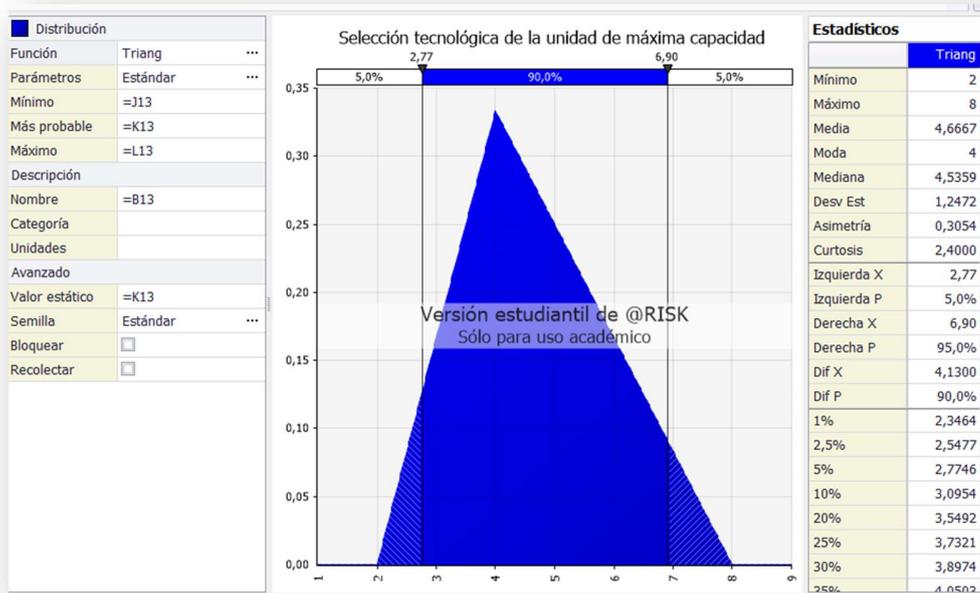


Figura 15. Ejemplo distribución de probabilidad subfactores. .Nota. Elaborado por el investigador con Software @risk.

Ejemplo de la distribución de probabilidad para uno de los eventos de incertidumbre técnicos:

Para cada uno de los (20) veinte subfactores se asignó la distribución de probabilidad, y de igual manera continuando con la metodología del modelo se calcula los resultados una y otra vez, cada vez usando un grupo diferente de valores aleatorios de las funciones de probabilidad, esto para 10.000 iteraciones en esta simulación. Se describe una de las muestras aleatorias, de las 10.000 tenidas en cuenta.

Tabla 24 Ejemplo muestra aleatoria de variables y subfactores

Variables (ponderación-%)	Subfactores (ponderación-%)	Escala de evaluación (0 a 10)	Valle Nereidas en planificación - Colombia (escenarios)				Distribución de probabilidad
			Pesimista (esc 1)	Normal (esc 2)	Optimista (esc 3)	Justificación	
Variable técnico	Calidad del recurso del yacimiento	Líquido saturado (2) Líquido dominantes (4) Mezcla (6) Vapor dominantes (8) Vapor seco (10) $X = 0$ $X < 0.2$ $0.2 < X < 0.6$ $0.6 < X < 1$ $X = 1$	4	6	8	Se debe hacer la perforación para hallar la composición del recurso - escenarios	6
	Temperatura del recurso	T < 100°C (2) 100°C < T < 150°C (4) 150°C < T < 200°C (6) 200°C < T < 300°C (8) T > 300°C (10)	8	8	8	Temperatura del reservorio 250 - 260°C (Alfaro, 2005)	8
	Selección tecnológica de la unidad de máxima capacidad	Contrapresión (2) Flash simple (4) Flash doble y triple (6) Binaria (8) Vapor seco (10)	2	4	8	Se tienen varias opciones, hasta ahora la más viable es flash simple (4) - escenarios	4
	Eficiencia de los sistemas adicionales de generación	Sin sistemas adicionales de generación (0) Modulares a contrapresión (2) Modulares flash simple (4) Modulares binarios (6) Ciclos combinados (8) Combinación ciclo combinado y modulares (10)	0	4	6	Actualmente se estudia la posibilidad de tener plantas modulares flash simple que reduzcan el riesgo en la inversión- escenarios	4
	Desarrollo de infraestructura - distancia a centros poblados > 15.000 habitantes	d > 50 km (2) 30 km < d < 50 km (4) 15 km < d < 30 km (6) 5 km < d < 15 km (8) d < 5 km (10)	4	6	6	En línea recta el campo geotérmico hasta Manizales tiene 20 km aprox. (Google Earth) - escenarios	6
	Subtotal	Variable técnico	4	5,8	7,4		5,8
Variables económico/ financiero	CAPEX - (MDD / MW)	\$ > 6 (2) 4.9 < \$ < 6 (4) 3.9 < \$ < 4.9 (6) 2.8 < \$ < 3.9 (8) \$ < 2.8 (10)	2	4	6	Estimación: \$US 5.4 millones/ MW (Strycon, 2017) - escenarios	4
	LCOE - (USD/ kWh)	\$ > 0.13 (2) 0.1 < \$ < 0.13 (4) 0.8 < \$ < 0.1 (6) 0.05 < \$ < 0.08 (8) \$ < 0.05 (10)	6	8	10	Estimación optimista: \$US 0.05/Kwh para tecnología flash (estudio U. Javeriana) - escenarios	8
	Subtotal	Variable económico /financiero	4,4	6,4	8,4		6,4

Variables (ponderación-%)	Subfactores (ponderación-%)	Escala de evaluación (0 a 10)	Valle Nereidas en planeación - Colombia (escenarios)			Justificación	Distribución de probabilidad
			Pesimista (esc 1)	Normal (esc 2)	Optimista (esc 3)		
Variable político / legal	Normativas y regulaciones sobre geotermia	Inexistente (2) En propuesta (4) En borrador (6) En proceso de aprobación (8) En vigor (10)	10	10	10	Ley 1715 de 2014	10
	Incentivos económicos	Pocos incentivos (2) Creditos con baja tasa de interés (4) Beneficios fiscales en inversión (6) Tarifas diferenciales (8) Subvención de la inversión (10)	6	6	10	Se brindan múltiples beneficios fiscales en la Ley 1715 - escenarios	6
	Alcance de la ley geotermica	Generación de energía (2) Generación y usos directos (5) Generación, usos directos y geotermia somera (10)	10	10	10	Ley 1715 de 2014	10
	Ley de energías renovables	Ley regulatoria de ERNC (2) Ley regulatoria e incentivos (5)	5	5	10	Ley 1715 regula las ERNC y da incentivos - escenarios	5
	Subtotal	Factor político/legal		7,5	7,5	10	
Variable ambiental	Cumplimiento de requerimientos ambientales	No cumple (2) Cumple (4) Reinyección parcial (6) Reinyección o utilización de CO2 (8) Reinyección total (10)	4	6	8	Se plantea la reinyección del máximo porcentaje posible y que sea económicamente viable - escenarios	6
	Cumplimiento del plan de manejo ambiental	Incumplimiento de 4 o más ítems de la norma (2) Incumplimiento de 3 ítems de la norma (4) Incumplimiento de 2 ítems de la norma (6) Incumplimiento de 1 ítem de la norma (8) Cumplimiento total del plan de manejo ambiental (10)	6	8	10	La empresa considera primordial cumplir totalmente con el plan de manejo ambiental, sin embargo se considerará optimista - escenarios	8
	Emissiones atmosféricas	No cumple (2) Cumple (4) Control del Hg y H2S (6) Reducción mayor al 85% de las emisiones (8) Huella de carbono cero -GEE (10)	4	6	8	En la planeación se considera importante controlar el Hg y el H2S por sus impactos - escenarios	6
	Vertimientos	No cumple (2) Cumple (4) Uso de fuentes de agua externas a la zona para la refrigeración (6) Tratamiento total de vertimientos (8) Bajo consumo de agua externa (10)	6	8	10	Se tiene contemplado el tratamiento total de los vertimientos generados en Valle de nereidas - escenarios	8
	Subtotal	Variable ambiental		4,8	6,8	8,8	
Variables socio /cultural	Identificación de comunidades especiales en el proyecto	No cumple (2) Se tiene certificación del ministerio (5) Caracterización de las comunidades especiales (7) Incluir a las comunidades especiales en la socialización (10)	7	10	10	Ya se tiene una caracterización de la comunidad aledaña al proyecto, no hay comunidades especiales - escenarios	10
	Capacitación al personal del proyecto	No cumple con los planes de capacitación (2) Capacitación al inicio del proyecto (4) Capacitación continua antes, durante y después del proyecto (6) Capacitación continua con identificación de necesidades (8) Capacitación continua con identificación de necesidades, evaluación y seguimiento (10)	6	10	10	La empresa espera realizar capacitación continua al personal del proyecto, identificando necesidades - escenarios	10
	Comunicación continua con la comunidad	Exclusión de las comunidades del proyecto (2) Generación de espacios informativos en torno al proyecto (5) Generación de espacios de información, interacción y escucha en torno al proyecto (7) Evaluación y seguimiento de la información e interacción con los involucrados (10)	5	10	10	La empresa es consciente de generar espacios de información, interacción y escucha con la comunidad - escenarios	10
	Educación y sensibilización a la comunidad	No cumplimiento de los planes de educación y sensibilización (2) Educación y sensibilización al inicio del proyecto (4) Educación y sensibilización continua antes, durante y después del proyecto (6) Educación y sensibilización continua con identificación de necesidades (8) Educación y sensibilización con identificación de necesidades, evaluación y seguimiento (10)	6	10	10	Se plantea un programa de educación y sensibilización permanente con la comunidad, identificando sus necesidades en el tiempo - escenarios	10
	Aprovechamiento de la energía residual geotermica en proyectos de uso directo	No hay aprovechamiento de la energía residual geotermica en proyectos de uso directo (2) Identificación de usos directos que benefician a la comunidad (4) Formulación e identificación de usos directos que benefician la comunidad (6) Implementación de proyectos de uso directo que benefician la comunidad (8) Análisis, evaluación y seguimiento del impacto de los usos directos en la comunidad (10)	6	8	10	Se proyecta formular e identificar usos directos que puedan beneficiar a la comunidad, sin embargo es necesaria la búsqueda de inversión - escenarios	8
	Bienestar social - empleo e infraestructura	No cumple con los planes de bienestar social, empleo e infraestructura (2) Identificación de planes enfocados en las necesidades de bienestar social del territorio (4) Formulación e identificación de planes enfocados en el bienestar social del territorio (6) Generar sinergia institucional para implementar los planes de bienestar social en el territorio (8) Análisis, evaluación y seguimiento a la implementación de los planes de bienestar social (10)	6	8	10	Se espera generar bienestar social en la comunidad, por medio del empleo, mejora de la infraestructura y desarrollo de nuevas actividades económicas - escenarios	8
	Subtotal	Variable socio /cultural		5,8	9,4	10	
TOTAL			5,2	7,1	8,9		7,1

Nota. Elaborado por el investigador.

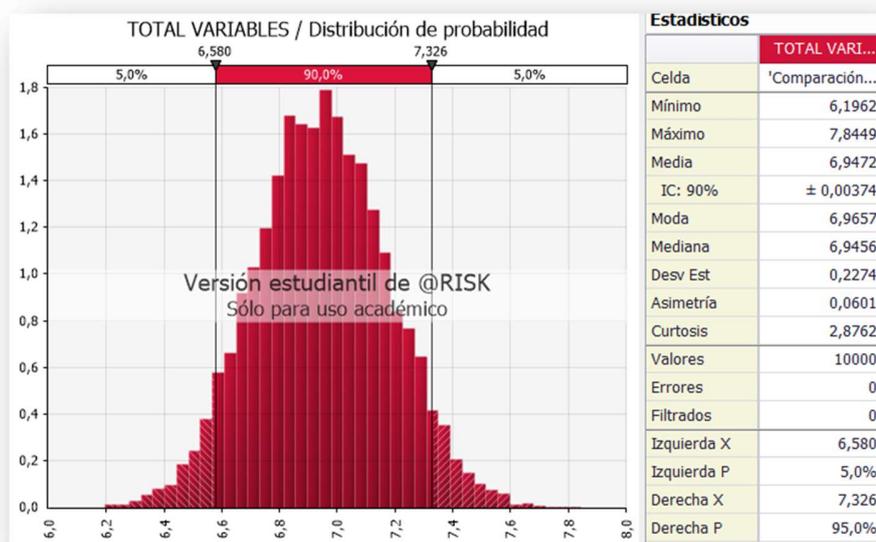


Figura 16. Distribución de probabilidad variables. Nota. Elaborado por el investigador.

Al validar los resultados se encuentra que las variables y subfactores se encuentran entre un 6,58 y 7,32 de calificación para un 90% de las muestras tenidas en cuenta (de un total de 10.000 iteraciones), lo cual indica desde las variables técnicas, económicas, legales, ambientales, sociales que encontramos un buen resultado si se considera que en el análisis integral e individual de variables, los puntajes superiores a valor (6) manifiestan un avance positivo (no siendo el más óptimo), en el hito requerido para cada uno de los subfactores de cada variable, sin embargo tratándose de (20) subfactores en total analizados, es importante entender cuales variables o subfactores nos impactan en mayor medida, para ello se realiza un análisis de varianzas verificando su contribución encontrando que (5) cinco de los (20) veinte subfactores impactan el 70% de los resultados.

Diseño de un modelo probabilístico para apoyar el estudio de incertidumbre y riesgo asociado a la ejecución del proyecto de Geotermia en Nereidas como ERNC en la región para CHEC S.A. E.S.P. BIC

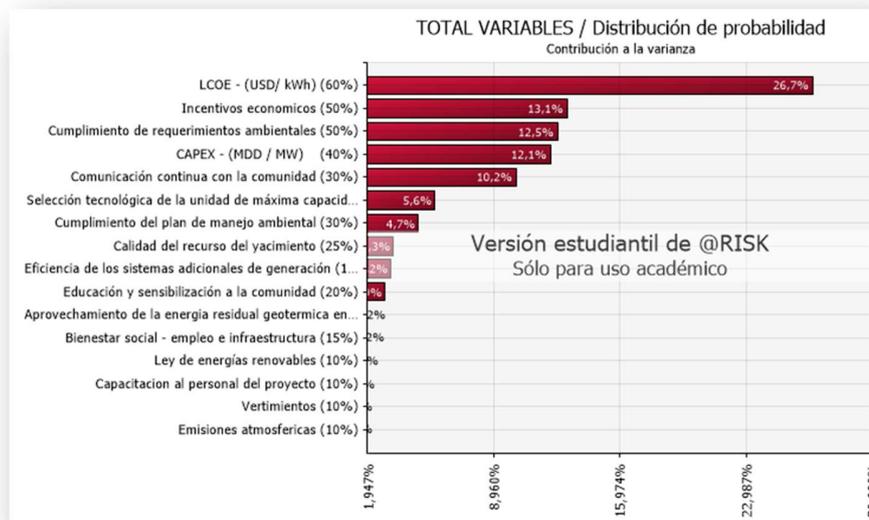


Figura 17 Total de Subfactores - varianza. Nota. Elaborado por el investigador con Software @risk.

Los subfactores a) LCOE (USD/ kWh), b) incentivos económicos, c) cumplimiento de requerimientos ambientales, d) CAPEX - (MDD / MW), e) comunicación continua con la comunidad; aportan el 70% de los resultados encontrados, es decir, una modificación en el hito de su valoración afecta ostensiblemente el proyecto.

En el análisis individual de estos (5) subfactores dentro del proyecto, observamos que el subfactor de incentivos económicos ha experimentado un avance significativo y ha sido respaldado por la ley 1715 de 2014, que otorga beneficios a las Energías Renovables No Convencionales (ERNC), y la Resolución 40302 de 2022, que respalda los registros geotérmicos. A pesar de reconocer la importancia de este subfactor, se ha destacado la necesidad de que el Ministerio de Minas y Energía colombiano diseñe beneficios adicionales, especialmente para la fase inicial de exploración de proyectos de esta índole, dada la amplia exposición a riesgos del proyecto, como se ha explicado detalladamente.

Es importante señalar que el control interno sobre este subfactor es limitado, ya que su naturaleza es principalmente normativa y regulatoria. Las posibles gestiones se limitan a solicitudes por parte del generador promotor de la inversión, el gremio de energía, el regulador, la UPME o el Ministerio de Minas y Energía. Estas entidades son responsables de comprender la importancia técnica y prospectiva en la transición energética de proyectos geotérmicos.

En cuanto a las variables legales o políticas, la evaluación final refleja una media de 7,67, con una probabilidad muy baja de que sea inferior a 6,8, lo que la convierte en una variable sólida y adecuada para la continuidad del proyecto hasta la fecha

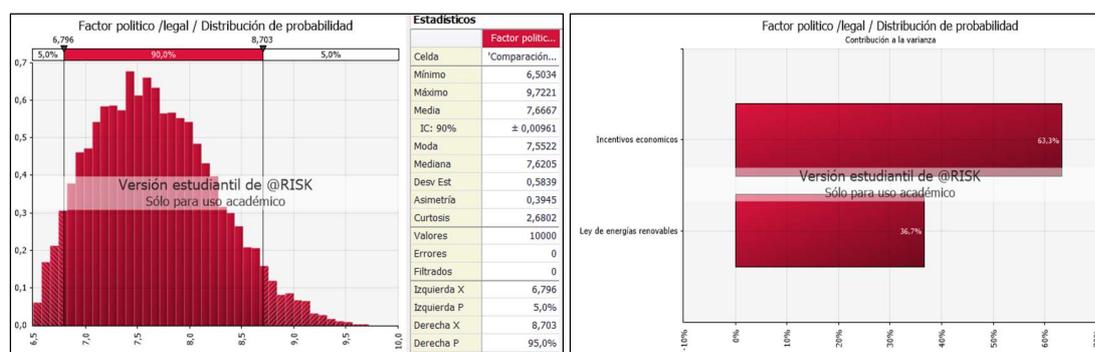


Figura 18. Resultados probabilísticos variable política / legal. Nota. Elaborado por el investigador con Software @risk

El subfactor "Cumplimiento de Requerimientos Ambientales" evalúa la capacidad del proyecto para reinyectar los fluidos utilizados en el proceso de generación de energía en el reservorio, siendo crucial para que la generación geotérmica sea considerada como Energía Renovable No Convencional (ERNC). La importancia de su calificación radica en que este proceso es fundamental para mantener la sostenibilidad y renovabilidad del reservorio. La curva de abatimiento, que representa el costo o beneficio social derivado de la implementación de medidas

Diseño de un modelo probabilístico para apoyar el estudio de incertidumbre y riesgo asociado a la ejecución del proyecto de Geotermia en Nereidas como ERNC en la región para CHEC S.A. E.S.P. BIC

para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), podría ser considerada como un indicador adicional al índice de costo-efectividad al priorizar medidas de eficiencia energética.

En el actual estado del proyecto, este subfactor ha avanzado significativamente, dado que la reinyección de fluidos es una prioridad, independientemente del tipo de generación geotérmica que finalmente se construya. Dentro de los estudios técnicos del proyecto y las responsabilidades ambientales establecidas en el licenciamiento ambiental, este subfactor se encuentra en una etapa avanzada. Al analizar solo las variables ambientales, su impacto es considerable, ya que contribuye en un 69,3% al resultado ambiental total. En el peor escenario de probabilidad, el valor de esta variable ambiental podría situarse en 5,97, según la distribución de probabilidad.

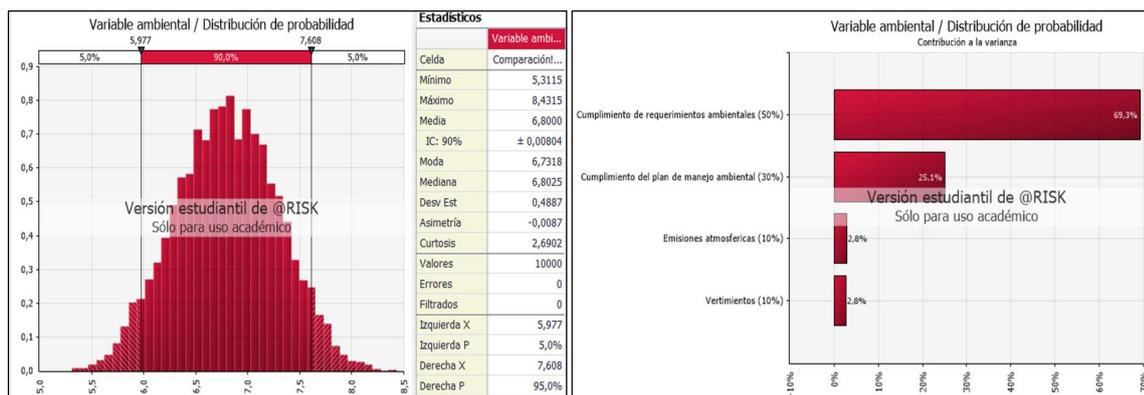


Figura 19. Resultados probabilísticos variable ambiental. Nota. Elaborado por el investigador con Software @risk

El subfactor comunicación continua con la comunidad, es el subfactor que mejor calificación tiene a la fecha, que le brinda el mayor valor, (10) evaluación y seguimiento de la información e interacción con los involucrados, es fundamental su seguimiento y el control a la fecha es detallado, específico y bien afianzado al interior del proyecto geotérmico, por esta razón y la consciencia interna del mismo no se encuentra importante establecer acciones adicionales, salvo su continuidad. Impacta en la contribución de la varianza de la variable social un 60,9%, sin

embargo, la propia variable se encuentra bien valorada teniendo una media para las 10.000 iteraciones de 8,4 indicando que se encuentra controlada acertadamente.

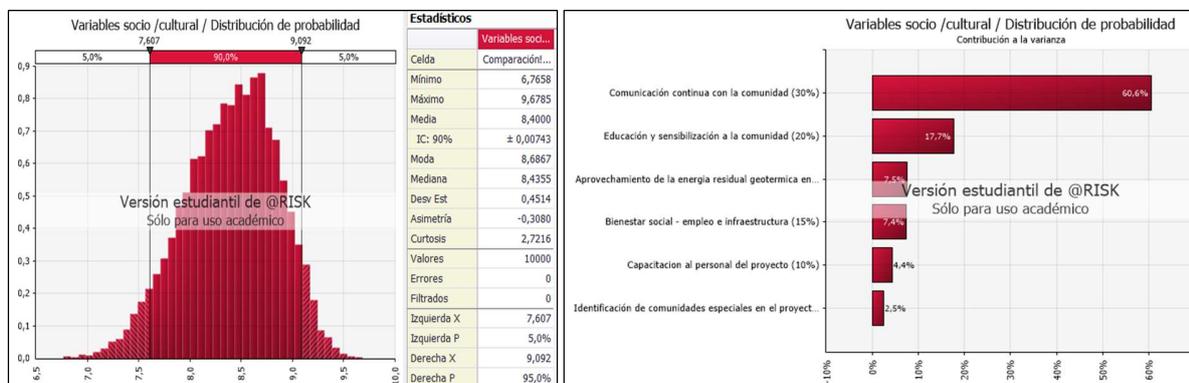


Figura 20. Resultados probabilísticos variable socio /cultural. Nota. Elaborado por el investigador con Software @risk

Los subfactores LCOE (USD/ kWh), CAPEX - (MDD / MW), ambos de la variable económica financiera, presentan una particularidad atención, dado que son los que reflejan la menor valoración con una media de 6.4 y a los que menores controles de proyecto se encontraron, así mismo, en conjunto a la valoración total de toda la evaluación probabilística de variables aportan el 36,7% de la contribución a la varianza.

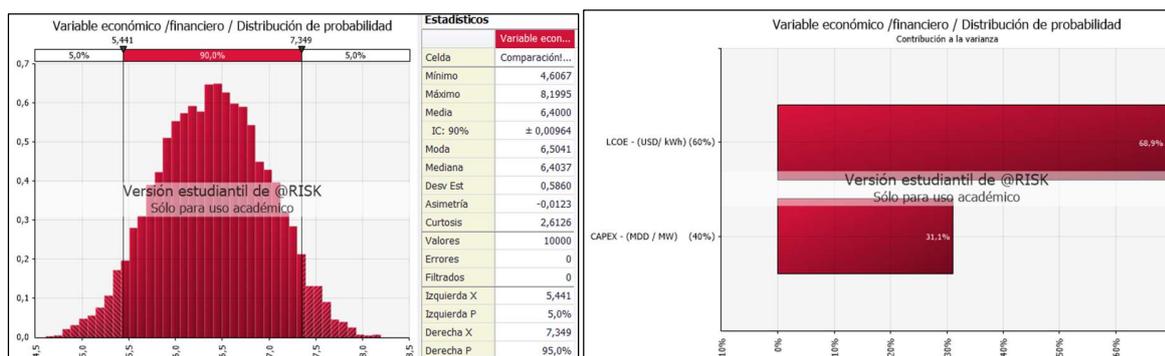


Figura 21. Resultados probabilísticos variable económico/financiero. Nota. Elaborado por el investigador con Software @risk

El análisis del Costo Nivelado de la Electricidad (LCOE, por sus siglas en inglés) es esencial para evaluar la viabilidad financiera de un proyecto geotérmico. Este enfoque considera la distribución de costos a lo largo de la vida útil del proyecto, proporcionando una visión precisa de los costos reales en términos de USD por kWh de energía producida. Aunque pueda resultar desafiante equilibrar las inversiones iniciales con los beneficios a largo plazo, el retorno de la inversión podría ser significativo.

En el caso específico del proyecto geotérmico Nereidas, el subfactor CAPEX (Inversión de Capital) - MDD / MW (Millones de dólares por Megavatio) se destaca como uno de los factores más impactantes en el LCOE. Este subfactor es crucial y determinante para la continuidad del proyecto, ya que está directamente vinculado a los resultados obtenidos para la inversión de capital del proyecto.

El modelo profundiza en este subfactor CAPEX - MDD / MW al considerar todas las inversiones necesarias para el proyecto, desde exploraciones y perforaciones hasta la construcción de la planta de energía, transmisión y distribución. Se utilizan escenarios de distribuciones de probabilidad PERT y Normal para cada concepto de CAPEX, y se realizan 10,000 iteraciones en la simulación. Cada iteración utiliza un conjunto diferente de valores aleatorios de las funciones de probabilidad asociadas con los conceptos de CAPEX. Aunque los valores monetarios específicos en las muestras aleatorias son ficticios por razones de confidencialidad, reflejan la importancia del modelo y las expectativas en la toma de decisiones para el promotor de la inversión, CHEC S.A. E.S.P. BIC. La introducción de datos estimados o reales al modelo a través del software @Risk de Palisade proporcionará probabilidades más precisas para la toma de decisiones.

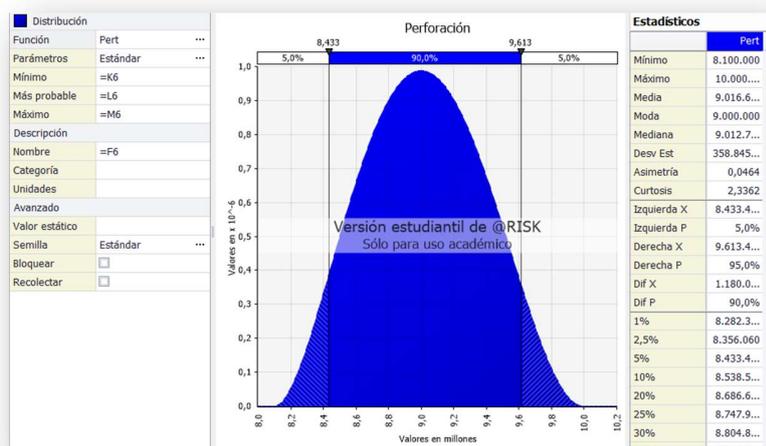
Tabla 25. Escenario CAPEX técnico proyecto geotérmico - simulación

CONCEPTO	Distribución de probabilidad	Minimo	Mas probable	Máximo	Distribución
Preliminar (estudios, ingenierías)	Pert	USD 3.610.000	USD 3.800.000	USD 3.990.000	3.800.000
Desarrollo - Costos indirectos del Propietario	Pert	USD 7.651.080	USD 9.000.000	USD 10.000.000	26.825.540
Perforación	Pert	USD 8.100.000	USD 9.000.000	USD 10.000.000	99.183.333
Recursos y Sistema de Recolección (RGS)	Pert	USD 538	USD 600	USD 600	38.332.768
Planta de energía	Pert	USD 11.518.248	USD 13.550.880	USD 14.228.424	34.645.083
Transmisión	Pert	USD 6.202.758	USD 6.265.412	USD 7.205.224	6.411.605
OE(Owner's Engineering) Ingeniería del Propietario y para contingencias	Normal	0,5%	1%	4%	1.045.992
					210.244.321

Potencia MW	65
Pozos Perforación	14

Nota. Elaborado por el investigador con Software @risk

Para el ejemplo de comprobación del modelo, se simuló una planta con capacidad de 65 MW, un total de 14 pozos de perforación (9 de producción y 5 de reinyección). Cada uno de los conceptos con una distribución de probabilidad como se muestra a continuación:



Diseño de un modelo probabilístico para apoyar el estudio de incertidumbre y riesgo asociado a la ejecución del proyecto de Geotermia en Nereidas como ERNC en la región para CHEC S.A. E.S.P. BIC

Figura 22. Ejemplo distribución de probabilidad conceptos técnicos de CAPEX. Nota. Elaborado por el investigador con Software @risk

Los resultados de la simulación reflejan que el proyecto podría tener unas inversiones con una media de 192 MMDD en un rango desde 160 MMDD a 224 MMDD dentro del 90% de los escenarios de probabilidad, pero, aunque los valores de entrada no corresponden a la realidad, y quizás este valor final puede ser diferente, si se dispone de la dispersión real que cada concepto puede tener en la planeación y ejecución del proyecto de construcción geotérmico.

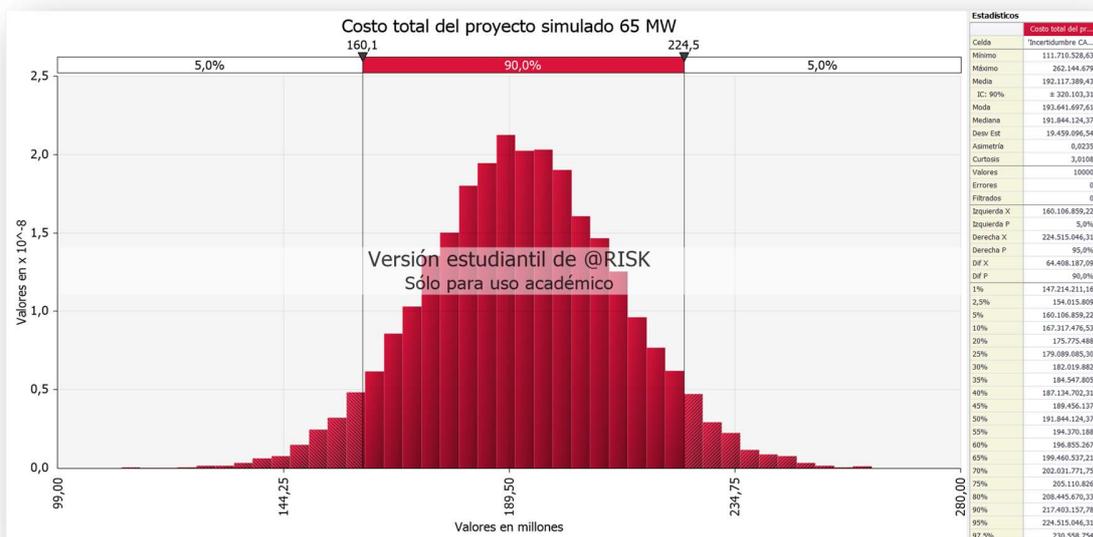


Figura 23 Distribución de probabilidad costo CAPEX del Proyecto. Nota. Elaborado por el investigador con Software @risk.

Por tanto, se analiza la contribución de la varianza de cada ítem, que responde a las gestiones y decisiones que corporativamente deban tomarse para llevar a cabo las ejecuciones del proyecto de geotermia.

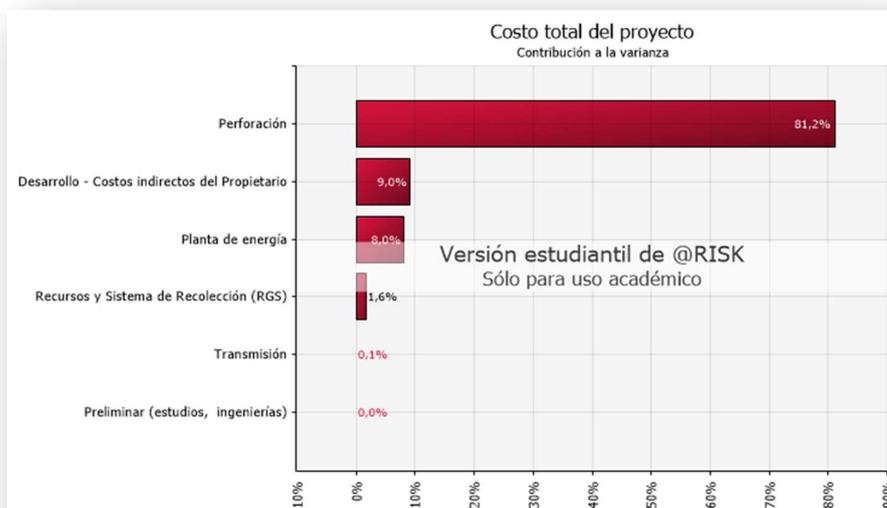


Figura 24. Varianza conceptos del CAPEX técnico .Nota. Elaborado por el investigador con Software @risk.

El análisis detallado revela que el concepto de perforaciones es el que presenta la mayor dispersión y, por ende, requiere una atención especial tanto en la ingeniería de exploración como en la ingeniería de construcción. Cualquier esfuerzo en este concepto tiene un impacto significativo del 81,2% en los resultados de CAPEX, lo que a su vez se traduce en un LCOE más eficiente. Este énfasis resalta la importancia de gestionar cuidadosamente las actividades relacionadas con la perforación para optimizar los costos del proyecto. El concepto de desarrollo, que abarca los costos indirectos del propietario, como estudios de ingeniería conceptual, licenciamiento ambiental, permisos de construcción, vías de acceso, exploración y perforaciones de producción e inyección, representa el segundo mayor impacto, contribuyendo con un 9%. Este concepto comparte similitudes con el primero, pero con un riesgo adicional debido a las actividades de soporte del proyecto.

La inversión en la planta de energía, que involucra la instalación que recibe el vapor de agua de los vapor ductos y acciona las palas de la turbina para convertir el calor en energía mecánica,

Diseño de un modelo probabilístico para apoyar el estudio de incertidumbre y riesgo asociado a la ejecución del proyecto de Geotermia en Nereidas como ERNC en la región para CHEC S.A. E.S.P. BIC

tiene un impacto del 8% en los resultados. Es esencial comprender la escalabilidad del proyecto, ya que esto define la capacidad de cada planta de energía, y la falta de escalabilidad puede afectar significativamente los costos. En contraste, el concepto de transmisión, que se refiere a la construcción de la línea de red de distribución, tiene una contribución mínima del 0,1% a la varianza. La analogía con otros proyectos de energías renovables destaca la importancia de la proximidad al punto de conexión a las subestaciones eléctricas, lo que puede ser determinante para la viabilidad del proyecto. Este análisis detallado proporciona una guía valiosa para la gestión de riesgos y la toma de decisiones, destacando áreas clave que requieren mayor atención y aquellas que tienen menos impacto en los resultados financieros del proyecto geotérmico Nereidas.

4.3 Análisis probabilístico proyecto Nereidas

Teniendo un panorama probabilístico de las variables y su tendencia respecto a los estudios e hitos en esta etapa del proyecto observamos la figura 25.

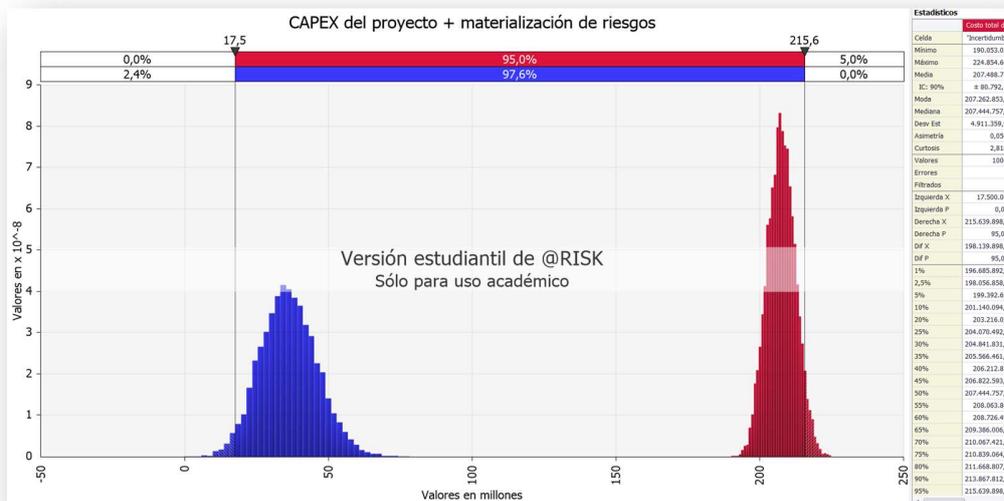


Figura 25. CAPEX del Proyecto Materialización de Riesgo. Nota. Elaborado por el investigador con Software @risk.

La figura anterior refleja las incertidumbres y los impactos en riesgos de manera integral que puede tener el proyecto, y refleja desde un panorama probabilístico las desviaciones que puede tener el proyecto, explicado anteriormente en las características que deben visualizar los promotores de la inversión, desde una vista técnica, desde una vista económica, desde una vista legal, ambiental y social, esto anidado al seguimiento de los escenarios de riesgos evitando que se materialicen e inviabilicen el proyecto. Este último facilita la toma de decisiones visualizando desde el concepto que más impacta en la varianza de los resultados.

5 Conclusiones y trabajos futuros

Conclusiones a los objetivos específicos planteados:

Objetivo específico: Revisar los antecedentes de modelos, proyectos o ejecuciones de Proyectos de geotermia, que brinden elementos cuantitativos de riesgos e incertidumbre para el proyecto de Geotermia en CHEC S.A. E.S.P. para cada una de las variables establecidas.

- El análisis de factibilidad del proyecto haciendo uso de los métodos determinísticos indica que un proyecto geotérmico en Colombia, y específicamente el proyecto Geotérmico Valle de Nereidas, parece ser poco atractivo para los inversionistas por los posibles escenarios de riesgo técnicos, económicos, políticos, sociales y ambientales. A partir de estos resultados, las decisiones de inversión frente a este tipo de tecnología podrían desincentivar la inversión en este tipo de generación renovable, a pesar de los estímulos presentes en las regulaciones del país, Centroamérica contiene los proyectos de ejecución geotérmica más visibles para Colombia, sin embargo, en dichos países su incentivo es mayor porque a diferencia de Colombia no compiten con fuentes hídricas por sus características geográficas.
- La energía geotérmica sigue siendo una opción llamativa para la diversificación de la matriz energética del país que depende en gran porcentaje de las hidroeléctricas. Los esfuerzos para la puesta en marcha de este tipo de proyectos siguen en pie aun cuando el ritmo al que se ha desarrollado no es tan rápido como las actuales tendencias y políticas de transición energética lo esperarían, particularmente porque se ha materializado con mayor perspectiva y ejecución al uso de proyectos solares o eólicos, sin embargo, el proyecto

Valle de Nereidas con el avance de Ingeniería física, geológica y química se vislumbra como el tenor de la transición energética por su aporte a la matriz energética .

- La transición energética incluyendo la geotermia, implica un reajuste en la configuración tanto de la oferta como de la demanda de energía eléctrica, lo que necesariamente modifica la dinámica de este mercado: por parte de la oferta los principales cambios son, mayor capacidad instalada en el Sistema, autogeneración y otros procesos privados, Project Finance en lugar de Corporate Finance para estructurar proyectos de generación, esto elimina la necesidad de tener un balance poderoso que respalde la inversión (pero requiere contratos de largo plazo) y facilita la entrada de nuevos participantes en la actividad de generación; por parte de la demanda , posibilidad de autoabastecimiento a costo razonable, usuarios con mayor disponibilidad de información para la toma de decisiones, cambios en el uso de la energía en industria, comercio y hogares, posibilidad de implementar planes de eficiencia energética en cualquier escala, no tienen que ser planes de gran tamaño.
- La energía geotérmica que brindará el proyecto Valle de Nereidas es una FNCER que contribuye con importantes ventajas ambientales comparadas con otras fuentes energéticas, con alta estabilidad y firmeza que permitiría diversificar la canasta energética local como ha ocurrido en otros países, no obstante es una inversión de largo plazo, con altos riesgos principalmente en sus fases iniciales, pues su potencial sólo se conocerá en la fase de factibilidad cuando ya se ha realizado en la exploración una inversión aproximada del 10% - 15% del total del proyecto, factores que hacen que la mayoría de los inversionistas y desarrolladores privados no estén dispuestos a asumir dichos riesgos, la inclusión de mayores beneficios de tipo regulatorio o legal, o “Grant” en la prefactibilidad inicial por exploración

del recurso, permitiría iniciar por parte de los inversores y promotores de generación de energía la exploración de todos los puntos identificados en Colombia con potencial geotérmico.

- Se resalta la importancia de CHEC S.A. E.S.P. BIC como patrocinador y ejecutor del proyecto Valle de Nereidas en cada una de las etapas del proyecto, ya que éste es un actor indispensable debido a su experiencia y conocimiento en el sector eléctrico; la empresa ha adquirido un gran conocimiento de la geotermia, tiene avances en exploración e incluso es fuente de conocimiento que ha estado impartiendo en diferentes escenarios, sin embargo, mayor valor agregado brinda su alianza estratégica con ECOPEPETROL y Baker Hughes líderes en exploración y perforación de hidrocarburos para asimilar toda la cadena productiva de generación geotérmica con el mejor Know How a través de las tres (3) organizaciones.
- Es significativo reconocer que la estadística juega un papel muy trascendental en el desarrollo de las investigaciones y en las ejecuciones de proyectos eléctricos, incluyendo el proyecto de geotermia del valle de Nereidas, una adecuada selección de las técnicas de análisis garantiza seguridad y veracidad a la investigación y planeación de los proyectos, por ende es importante que la empresa, planeadores de proyectos, diseñadores e investigadores tengan claro: identificar las técnicas de muestreo para seleccionar la muestra, identificar las variables a estudiar, que tipo de variable son y el método más apropiado para el respectivo análisis de los datos recogidos, llevarán a entender las mejores decisiones de ejecución.

Objetivo específico: Establecer e incorporar en el modelo probabilístico los componentes para determinar la factibilidad de un proyecto de Geotermia de ERNC.

- Se observan ventajas muy representativas al realizar un análisis de riesgos probabilístico para el proyecto geotérmico Valle de Nereidas, entre las que se encuentran: se mejoran las

probabilidades de éxito al analizar las posibles fallas; promueve cambios en el plan de proyecto y controles de proyecto al descubrirse debilidades en el mismo; ayuda a establecer rangos razonables de resultados aceptables, reconociendo la incidencia de riesgos; crea conciencia sobre los eventos que en mayor probabilidad pueden afectar el proyecto.

- Tras el análisis realizado en el caso de estudio del proyecto Valle de Nereidas, se pudo observar que las características geológicas del lugar donde se ha llevado a cabo el proyecto geotérmico, tienen un gran impacto sobre la factibilidad del proyecto. Un aumento en recursos como la temperatura, pueden generar que el valor de las variables identificadas como técnicas y económicas, sean atractivas para los inversionistas. De esta manera, las primeras fases del proyecto en las cuales se identifica el tipo de recurso geotérmico y la calidad del mismo son de vital importancia para el desarrollo de las fases posteriores y la continuidad del proyecto.
- El análisis detallado probabilístico revela que el concepto de perforaciones es el que presenta la mayor dispersión y, por ende, requiere una atención especial tanto en la ingeniería de exploración como en la ingeniería de construcción. Cualquier esfuerzo en este concepto tiene un impacto significativo del 81,2% en los resultados de CAPEX, lo que a su vez se traduce en un LCOE más eficiente. Este énfasis resalta la importancia de gestionar cuidadosamente las actividades relacionadas con la perforación para optimizar los costos del proyecto.
- El análisis del Costo Nivelado de la Electricidad (LCOE, por sus siglas en inglés) es esencial para evaluar la viabilidad financiera del proyecto geotérmico Valle de Nereidas. Este enfoque considera la distribución de costos a lo largo de la vida útil del proyecto, proporcionando una visión precisa de los costos reales en términos de USD por kWh de

energía producida. El subfactor LCOE (USD/ kWh), en el modelo probabilístico detallado aporta el 26,7% de los resultados encontrados, es decir, una modificación en el hito de su valoración afecta ostensiblemente el proyecto.

Objetivo específico: Identificar alternativas y estrategias con base en probabilística, que se traducirán en recomendaciones que serán útiles para cada etapa del proyecto, con el fin de minimizar el riesgo en su construcción.

- Mediante la valoración y simulación del proyecto Valle de Nereidas bajo el modelo de Montecarlo, se demuestra que la incertidumbre es un factor que se debe tener en cuenta al momento de evaluar la factibilidad y viabilidad de proyectos, en especial los pertenecientes al sector de la energía. Lo anterior dado que es un parámetro que agrega valor al proyecto, al considerar diferentes escenarios y brindar flexibilidad a las características que se ajustan a la realidad de los proyectos de inversión., prediciendo el resultado de las acciones en un escenario de riesgo.
- Las curvas de abatimiento pueden ser una pauta adicional al índice de costo efectividad que es posible considerar al momento de priorizar las medidas de eficiencia energética, entendiéndose las curvas de abatimiento como el costo o beneficio social que devenga la implementación de medidas enfocadas a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). En el ejercicio comparativo de curvas de costo de abatimiento de generación de ERNC se concluye que la fuente que menos requiere de inversión para el abatimiento de (1) TCO_{2eq}, en relación con el uso de recursos naturales bióticos y abióticos requeridos para su construcción, operación, mantenimiento y abandono, es la energía geotérmica incluido el proyecto de Valle de Nereidas, esto genera una certidumbre positiva

para la variable ambiental del proyecto. En cambio, la tecnología de generación solar fotovoltaica se ve castigada en esta comparación con los pocos años de generación en su vida útil y por la problemática de la disposición final de los paneles solares.

- Bajo la teoría de la Economía Circular, a propósito de las variables ambientales y su probabilidad de afectación o reparación, se debe propender por determinar las acciones que hagan la actividad productiva sostenible en el tiempo, minimizando los impactos ambientales generados, es por eso que a continuación se mencionan algunas desventajas relacionadas con las fuentes no convencionales de energía renovable. Para el caso de la generación de energía solar fotovoltaica se ve desfavorecida por el alto impacto en la extracción de recursos naturales para la fabricación de los paneles requeridos, así como las incertidumbres actuales para el tratamiento, retorno a la actividad productiva o disposición final de los mismos, y la velocidad de generación ya que estos cuentan con una vida útil limitada, sin tener en cuenta los daños que se pueden presentar durante las actividades de instalación y mantenimiento. Este mismo impacto se puede evidenciar para el caso de la generación eólica, por las extensiones que requiere para su operación, así como la afectación a la fauna. La generación de energía geotérmica a través del proyecto Valle de Nereidas, en cambio, a pesar de tener impactos ambientales en el ecosistema que se desarrolla, sus áreas de impacto directo pueden ser reducidas durante el cambio de las etapas de ejecución del proyecto, y busca lograr un proceso de adaptación del ecosistema en el tiempo, además de su prolongada vida útil.
- Los requerimientos de espacio necesarios para la instalación de granjas solares, altera las condiciones naturales de uso del suelo generando a su vez alteraciones en las condiciones fisicoquímicas del mismo, en el ciclo del agua, y en la biodiversidad asociada al ecosistema

donde se desarrolle el proyecto, los cuales estarían en contra de los criterios de producción y consumo sostenible, en el caso del proyecto geotérmico Valle de Nereidas esta situación se disminuye con una producción de energía respecto al uso del suelo mínima.

- En un ejercicio comparativo de las fuentes mencionadas anteriormente, la generación de energía geotérmica a pesar de tener impactos ambientales en el ecosistema que se desarrolla, las áreas de impacto directo pueden ser reducidas durante el cambio de las etapas de ejecución del proyecto, así como buscar lograr un proceso de adaptación del ecosistema en el tiempo, además de su larga vida útil.
- Pese a la existencia de algunos avances relevantes en la maduración de la legislación de proyectos de geotermia en Colombia, aún falta poner en marcha “incentivar los trabajos de exploración e investigación del subsuelo con el fin de conocer el Recurso geotérmico”, como lo señala el Decreto 1318 de 2022, sin estos incentivos los inversionistas difícilmente estarán interesados en estos proyectos, toda vez que el riesgo de exploración lo asumirían únicamente los promotores de la inversión. El proyecto geotérmico Valle de Nereidas requiere de “Grants” que faciliten esta ejecución.
- El modelo mostrado refleja las incertidumbres y los impactos en riesgos de manera integral que puede tener el proyecto geotérmico Valle de Nereidas, y refleja desde un panorama probabilístico las desviaciones que puede tener el proyecto, así mismo con un orden de impacto de acuerdo al análisis de varianza de las simulaciones realizadas, todo desarrollado según la teoría de varios actores desde una vista técnica, desde una vista económica, desde una vista legal, ambiental y social, esto anidado al seguimiento de los escenarios de riesgos evitando que se materialicen e inviabilice el proyecto.

Recomendaciones y trabajos futuros.

- Tener presente que la demanda eléctrica es instantánea y no espera, lo que conduce a demandar inmediatamente potencia y energía al momento de necesitarse, no importa la hora o la fracción de segundo que se necesite. Lo anterior obliga a que la potencia (MW) y la energía (kWh) demandadas estén disponibles en el instante en que se requieran para satisfacer las necesidades eléctricas en ese momento y garantizar así la continuidad del servicio todo el tiempo, sin embargo, en Colombia un kWh de energía tiene el mismo costo para el usuario independiente de la fuente de obtención de esa energía, básicamente por las características del sistema eléctrico colombiano.

La firmeza cobra un valor importante en tiempos de Fenómeno del niño, o cuando fallan o se retrasan grandes proyectos a vincularse a la matriz energética (caso HidroItuango), o cuando por temas sociales no se tiene ruta de evacuación de energía para proyectos de FRNC (Caso línea STN Colectora – Cuestecitas), no obstante el mercado energético actual no valora de manera particular un proyecto que entregue continuidad en el suministro de energía como es el caso de proyectos geotérmicos. ¿Qué podría cambiarse en el mercado energético, para proyectos que no dependen de variables atmosféricas, o naturales para la confiabilidad y brindarles un mayor valor agregado?

- En el diseño de Subestaciones elevadoras o reductoras; o diseño de líneas de conexión o uso, las variables de entrada están ligadas a la capacidad de carga, la capacidad del sistema definido al cual se le importará energía o será entregada y sin estos datos específicos no es posible desde la ingeniería un diseño conceptual, de detalle o secundario válido; sin embargo, los proyectos geotérmicos y tal es el caso del Valle de Nereidas y en otrora los

proyectos de hidrógeno y quizás nucleares, presentan una particularidad y es su escalabilidad, esto es, que a diferencia de un proyecto solar o eólico donde defino mi capacidad en MWp (DC) según la cantidad de equipos, o un proyecto hídrico que defino mi capacidad en MW (AC) de acuerdo al caudal o capacidad de embalse; en proyectos Geotérmicos dada su naturaleza no es posible identificar o limitar la capacidad de producción dada la posible escalabilidad en la potencia de la planta, para el caso del proyecto de Geotermia Valle de Nereidas el rango hoy día sin exploración, suscita entre 25 MW y 100 MW la capacidad de planta, lo cual representa un reto para los diseñadores de subestaciones y líneas de conexión, donde deberán integrar en sus diseños finales un ejercicio de costo – beneficio técnico, para establecer bajo incertidumbre el diseño más óptimo o versátil según las características flexibles de la planta geotérmica, y que para otro tipo de proyectos como el hidrógeno podría presentar la misma particularidad.

- Al interior de la academia hace falta contar con más literatura sobre energía geotérmica, sólo ha sido posible encontrarla en la construcción de este documento, en la academia ligada a la geología, sin embargo, el alcance de esta se ciñe a la geofísica, la geología y geoquímica; estudios de ingeniería eléctrica con esta FERNC son muy limitados o casi nulos, y es una fuente que en Colombia ya cuenta con un piloto comprobado y un proyecto como el observado a punto de ser factible, además el gran potencial geotérmico energético en Colombia identificado de 1,170 MW, con factor de planta superior al 90% con capacidad de producir alrededor de 9 TWh – año de energía, lo hace una fuente de estudio impactante en la necesidad energética de Colombia.
- Queda abierto un amplio camino para la puesta en marcha de proyectos de uso directo, usando el calor geotérmico residual del proceso de generación eléctrica, el proyecto del

Diseño de un modelo probabilístico para apoyar el estudio de incertidumbre y riesgo asociado a la ejecución del proyecto de Geotermia en Nereidas como ERNC en la región para CHEC S.A. E.S.P. BIC

Valle de Nereidas no es la excepción, se pueden llevar a cabo proyectos secundarios que, en condiciones normales, emplearían fuentes de energías no renovables y contaminantes para su ejecución, la ingeniería eléctrica puede aportar mucho en la industrialización con fuentes residuales geotérmicas. El uso adecuado de los recursos geotérmicos puede contribuir al desarrollo de energía sostenible en todas las dimensiones ya que el desarrollo de la energía geotérmica está profundamente relacionado con la sostenibilidad no solo a nivel local sino regional y global.

6 Referencias

- .Adhikary, P., Roy, PK., Mazumdar, A. (2015). Optimal renewable energy project selection: A multi-criteria optimization technique approach. *Global Journal of Pure and Applied Mathematics*. Volume 11, Issue 5, Pages 3319-3329.
- Agencia Internacional de Energías Renovables – IRENA (2015). Renewable Energy Policy Brief, México Disponible en: http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_RE_Latin_America_Policies_2015_Country_Mexico.pdf
- Alfaro, C. (2015). Improvement of Perception of the Geothermal Energy as a Potential Source of Electrical Energy in Colombia, Country Update. *Proceedings World Geothermal Congress 2015*. Melbourne, Australia, 19-25 April, 2015.
- Alfaro, C. Bernal, N., Ramírez, G., Escobar, R. (2000). *Proceedings World Geothermal Congress 2000*. Kyushu-Tohoku, Japan, May 28 - June 10, 2000.
- Alfaro, C., Velandia, F., Cepeda, H. (2005). Colombian Geothermal Resources. *Proceedings World Geothermal Congress*. Antalya, Turkey, 24-29 April, 2005.
- Allis, R., Bromley, C., Currie, S. (2009). Update on subsidence at the Wairakei–Tauhara geothermal system, New Zealand. *Geothermics* 38, 169–180.
- Alstom (2009). Alstom introduces new ALSPA® Series 6 control system offering. Página oficial de la compañía: <https://www.alstom.com/press-releases-news/2009/5/Alstom-introduces-new-ALSPA-Series-6-control-system-offering-20090527>
- Amador Cabra, L. (2011). Los servicios públicos frente a las reformas en Colombia Primera edición (1), 179
- Arango, M., Arroyave, E., & Hernández, J. (2013). Valoración de Proyectos de Energía Térmica Bajo Condiciones de Incertidumbre a través de Opciones Reales. 12(56), 18.
- Arellano, VM., García, A., Barragán, RM., Izquierdo, G., Aragón, A., Pizano, A. (1999). A conceptual model of the Los Humeros, Puebla, México, geothermal reservoir in its natural state. *Geothermics* Vol 15 111-120 (1999).
- Armenta, M.C.F., Montes, M.R., Medina, F.S., López, C.R. (2012). Results of test of acid fluids neutralization in the well H-43, Los Humeros geothermal field. *Geothermics* Vol 25 32-38 (2012).

- ARPAT (2015). Concentration of sulphuric acid in the geothermal areas of Tuscany. Validation of ENEL data and ARPAT monitoring. Report year 2014 (in Italian). Open File Report <http://www.arpat.toscana.it/documentazione/report/report-geotermia/verifiche-autocontrollo-enel/concentrazione-h2s-nelle-aree-geotermichevalidazione-dati-enel-2014>
- ARPAT (2017). Monitoring of the geothermal areas of Tuscany, year 2015. Control of geothermal power plants emissions (in Italian). Open File Report <http://www.arpat.toscana.it/documentazione/report/report-geotermia/monitoraggio-delle-areegeotermiche-toscane-anno-2015>
- Astudillo, A. (2012). Falta de equipos y alto costo de exploración limitan inversión en Geotermia [en línea]. 26 de diciembre de 2012. <<http://www.latercera.com/noticia/falta-de-equipos-y-alto-costo-de-exploracion-limitaninversion-en-geotermia/>>. [Consulta: 24 de febrero de 2017].
- Baldacci, A. & Sabatelli, F. (1997). Perspectives of geothermal development in Italy and the challenge of environmental conservation. ENEL - PGEIUSP, Vía Andrea Pisano 120.
- Barriga, S. (2007). Electrical geothermic power generation in Chile: analysis of conditions for sustainable development. Universidad del Bío Bío. Concepción, Chile.
- Battocletti, L. & Lawrence, B. (1999). Geothermal Resources in Latin America & the Caribbean. Report prepared for Sandia National Laboratories and the US Department of Energy, Office of Geothermal Technologies. Contract No. AS-0989. February 1999.
- Bertani, R., Bertini, G., Cappetti, G., Marocco, B. (2005). An update of the Larderello-Travale/Radicondoli Deep geothermal system. Proceedings of the World Geothermal Congress 2005, Antalya, Turkey, 2005.
- Bertini, G., Cappetti, G., Dini, I., Lovari, F. (1995). Deep drilling results and updating of geothermal knowledge of the Monte Amiata area. Proceedings of the World Geothermal Congress 1995, Florence, Italy, 2, pp. 1283-1286, 1995.
- Bettagli, N. & Bidini, G. (1996). Larderello-farinello-valle secolo geothermal area: exergy analysis of the transportation network and of the electric power plants. Geothermics Vol. 25, No. 1, pp. 3-16, 1996. Elsevier Science Ltd.
- BID, B. I. de D. (2021). Geotermia en Colombia. Congreso Internacional de Energías Renovables y Rueda de Negocios, Bogotá, D.C. <https://ser-colombia.org/wp-content/uploads/2021/11/4.-La-geotermia-tiene-futuro-en-Colombia.pdf>

- Blanco, S. S. S. (2020). Panorama Mundial de la Energía Geotérmica: Generación de electricidad. 1, 4.
- Bolívar, H. (2001). Elementos para la evaluación de proyectos de inversión. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería. ISBN: 9703200907.
- Bona, P. & Coviello, M. (2016). Valoración y gobernanza de los proyectos geotérmicos en América del Sur: Una propuesta metodológica. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).
- Bunel, E. (2019). Como podemos aumentar la sustentabilidad en los procesos extractivos de litio?. Tecnologías Emergentes de Extracción y Procesamiento de litio.
- Cappetti, G. (2016). La experiencia italiana en geotermia. Enel Green Power. Uruguay 8 de septiembre de 2016.
- Cappetti, G. (2019). Cerro Pabellón geothermal plant: a success story. GEOLAC Santiago - Chile – July 17, 2019.
- Cárdenas_Catalán, J. A., Alvarez_Arias, C., Kari_Ferro, A., Peña, N. G. E., Huaraca_Aparco, R., & Flores_Pacheco, N. F. (2022). Métodos probabilísticos en discontinuidades para la estabilidad de los túneles y semitúneles viales de Karkatera-Abancay. C&T Riqchary Revista de investigación en ciencia y tecnología, 4(1), 26-32. <https://doi.org/10.57166/riqchary/v4.n1.2022.85>
- Carmona, C., Gómez, J., Hernández, A., Morales, J.L., Reyes, J.I., (2010). Proyectos de inversión. Instituto Politécnico Nacional, México.
- Castells, A. F., & Pastallé, S. O. (2020). Estudio de Almacenamiento de Calor en Profundidad. 1, 2(2), 174.
- Castro, R., Gutiérrez, K., Ríos, R. & Soriano, W. (2014). Diseño preliminar de sistema de acarreo y selección de equipos principales para una planta geotérmica a condensación. Programa Regional de Entrenamiento Geotérmico (PREG).
- Central, R. (2020). Geotermia en la Región Central (1.a ed.). Universidad Distrital Francisco José de Caldas. https://regioncentralrape.gov.co/wp-content/uploads/2020/05/Cptl06-GEOTERMIA-EN-LA-REGION-CENTRAL.VF_.pdf
- Chamorro, C. (2009). Geothermal power production. Worldwide current status and perspectives.
- Chávez, S. (2018). El Concepto de Riesgo. 1, 1.

- Chavot, P., Heimlich, C., Masseran, A., Serrano, Y., Zoungrana, J., Bodin, C. (2018). Social shaping of deep geothermal projects in Alsace: politics, stakeholder attitudes and local democracy. *Geothermal energy*.
- CHEC (2022). Informe de Sostenibilidad 2022. Grupo EPM. https://www.sostenibilidadchec.com/anteriores/Informe_de_sostenibilidad_2022.pdf
- Chomać, E., Sobczak, A., & Sobón, D. (2022). The Potential and Development of the Geothermal Energy Market in Poland and the Baltic States-Selected Aspects. 1(1), 20.
- Cinguenza Riaño, N. (2018). El Gobierno expidió un decreto para diversificar la matriz energética. *Diario La República*. <https://www.larepublica.co/economia/el-gobierno-expidio-un-decreto-para-diversificar-la-matriz-energetica-del-pais-2705735>
- Congreso de Colombia (2014). Ley 1715 de 2014. Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional. *Diario Oficial*, 49.150. https://www.upme.gov.co/Normatividad/Nacional/2014/LEY_1715_2014.pdf
- Coronado, Y., García, A. & Martínez, D. (2015). Metodología para la elaboración de un modelo conceptual a partir de datos geológicos, geofísicos y geoquímicos en la fase de reconocimiento y prefactibilidad de un proyecto geotérmico. Programa Regional de Entrenamiento Geotérmico (PREG).
- Del Castillo, F. (2014). Generación de potencia eléctrica a partir de la geotermia. Universidad Carlos III de Madrid.
- Dewhurst K. (2014). Geothermal Project in Colombia Succeeds Through Participatory Development. 2014 digital edition of *Renewable Energy World*.
- Dewhurst K. (2014). Social and Political Consequences of Geothermal: A Case Study from the Nereidas Valley, Nevado del Ruiz, Colombia. *Geothermal Resources Council Transactions*, Vol. 38, 2014.
- Dickson, M.H. y Fanelli, M. (2004). *What is geothermal energy?* Pisa, Italia.
- DiPippo, R. (2008). Chapter 11 - Larderello Dry-Steam Power Plants, Tuscany, Italy. *Geothermal Power Plants (Second Edition)*. Principles, Applications, Case Studies and Environmental Impact, Pages 255-275.
- DiPippo, R. (2016). Chapter 11 - Larderello Dry-Steam Power Plants, Tuscany, Italy. *Geothermal Power Plants (Fourth Edition)*. Principles, Applications, Case Studies and Environmental Impact 2016, Pages 321-343.

- Empresas Eléctricas A.G. (2017). Licitaciones Vigentes - Programa licitación suministro 2017/01. <<http://www.licitacioneselectricas.cl/licitaciones-vigentes/programa/>>. [Consulta: 24 de febrero de 2017].
- Enel Green Power (s.f.). EIA., 2011. Open File Report (in Italian) <http://www.regione.toscana.it/documents/10180/317162/siamiliatomo4sintesisintecnica.pdf/29574fdf-0807-4a01-bc07-3dff79838179>
- Ferriols, R., & Alós, M. (2011). Métodos de análisis de la incertidumbre. *Farmacia Hospitalaria*, 35, 3-9. [https://doi.org/10.1016/S1130-6343\(11\)70016-2](https://doi.org/10.1016/S1130-6343(11)70016-2)
- Flores M., Ramírez M. & Morales L. (2015). Wellbore Modeling of Production Well H-1D using WellSim, Los Humeros Geothermal Field, México. *Proceedings World Geothermal Congress 2015*. Melbourne, Australia, 19-25 April 2015.
- Flórez, C. A., Hernández, A., & Lesmes, H. (2011). Atlas de Radiación Solar de Colombia (Vol. 1). UPME. <https://biblioteca.minminas.gov.co/pdf/Atlas%20de%20radiaci%C3%B3n%20solar%20Colombia.pdf>
- Fridkinsson, T., Merino, A., Orucu, Y., & Audinet, P. (2017). Greenhouse Gas Emissions from Geothermal Power Production. 1, 1(1), 12.
- Fundación Terram (2017). SMA abre proceso por daño ambiental contra la central geotérmica Cerro Pabellón. Información recolectada en la web de Fundación Terram: <https://www.terram.cl/2018/10/sma-abre-proceso-por-dano-ambiental-contra-la-central-geotermica-cerro-pabellon/>
- García, A., Martínez, J., Ovando, R., Vazquez, A., Rosales C. (2015). Thermal Efficiency of the Los Humeros Geothermal Field Fluid Transportation Network. *Instituto de Investigaciones Eléctricas. Proceedings World Geothermal Congress 2015*. Melbourne, Australia, 19-25.
- García, C. M. (2021). Decisiones estratégicas de inversión en energía renovable para generadores en un mercado eléctrico competitivo (1.a ed., Vol. 1). Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/81996/43752650.2022.pdf?sequence=3&isAllowed=y>
- García, R.D., Gutiérrez S.L., Pareja E.R., Pusquin L.T., Dewhurst W.T., López J.P. (2013). Case Study and First Look: Contemporary Magnetotelluric Studies Within Nereidas Valley,

- Nevado del Ruiz Volcano, Colombia. Geothermal Resources Council Transactions, Vol. 37, 2013.
- Gehring, M. & Loksha, V. (2012) - SMAP. Manual de geotermia: cómo planificar y financiar la generación de electricidad.
- Geri, G., Perusini, P., Rossi, A. (1984). Topographic changes in the Travale-Radicondoli geothermal field during the first ten years of exploitation. Land subsidence. Proc. 3rd symposium, Pages 631-639.
- Gil, A. (2019). La Energía Geotérmica como Fuente Alternativa de Abastecimiento para la Demanda en Colombia (1.a ed., Vol. 1). UNAD. <https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/26919/%20amgilg.pdf;jsessionid=AC7B01A93ED426ACB2E9F692D73CF655.jvm1?sequence=1>
- Gonzales, Z. (s.f.). Desarrollo sostenible y evaluación del impacto ambiental de tres yacimientos geotérmicos con potencial de explotación en México. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, CICESE. Fuente.: <http://cemiegeo.org/index.php/proyectos/desarrollo-e-innovacion-de-tecnicas-de-exploracion/p23/9-linea-de-investigacion/proyecto?start=20>
- González, L. & Vidaud, I. (2009). Factores para evaluar la viabilidad de proyectos de conservación de edificaciones esenciales, no productivas, en zonas sísmicas. Ingeniería 13-1, páginas: 25-39.
- Gordon, R. (2006). Economic factors to consider when assessing direct-use geothermal development viability. Transactions - Geothermal Resources Council, Volume 30 I, Pages 179-183.
- Green, E. (2021). Central geotérmica. <https://www.enelgreenpower.com/es/learning-hub/energias-renovables/energia-geotermica/central-geotermica>
- Greider, Bob (1998). Cost factors in geothermal production of electricity. Bulletin. Geothermal Resources Council Volume 27, Issue 1, Pages 14-17.
- Guerrero, J. (2019). Modelo de planificación estratégica con una quinta perspectiva socioambiental, para explotar la energía geotérmica, e integrar la sostenibilidad socioambiental en Costa Rica. <https://repositorio.uned.ac.cr/handle/120809/1795>

- Gutiérrez, L. (2019). Current status of geothermal-electric production in Mexico. 2nd International Geothermal Conference. Conference Series: Earth and Environmental Science 249 (2019) 012017.
- Gutiérrez, L., Maya, R. & Quijano, J. (2010). Current Status of Geothermics in Mexico, Proceedings. World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia, 25-29 April.
- Hernández, E., Avitia, P., Cisneros, J., & Prieto, M. (2019). Thermodynamic simulation and mathematical model for single and double flash cycles of Cerro Prieto geothermal power plants. Geothermics vol. 83, 101713.
- Herrera, L., Pesca, J. P., & Cortés, D. (2021). Energía Renovables Fotovoltaicas: Una Aproximación Descriptiva de su Estado y su Aplicación en Colombia (1.a ed., Vol. 1). Universidad EAN.
<https://repository.universidadean.edu.co/bitstream/handle/10882/11386/CortesDavid2021.pdf?sequence=1>
- Hidalgo, C., & Assis, A. (2011). Evaluación Incertidumbre en el Análisis de Estabilidad de un Talud Excavado en Suelos Residuales (Congreso Panamericano de Mecánica, Vol. 1).
https://www.researchgate.net/publication/294874209_EVALUACION_DE_LA_INCERTIDUMBRE_EN_EL_ANALISIS_DE_ESTABILIDAD_DE_UN_TALUD_EXCAVADO_EN_SUELOS_RESIDUALES
- Higgins, YO., Burnett, DB., Kreuter, U., Haut, RC. (2017). Pre-development research to understand stakeholder perceptions of energy development in environmentally sensitive áreas. Unconventional Resources Technology Conference 2017.
- Hiraishi, T., Odingo, R., & Galbally, I. (2013). Bases Conceptuales para el Análisis de Incertidumbre. 2, 5(1), 24.
- Huang, Y., Zhang, Y., Hu, Z., Lei, H., Wang, C., Ma, J. (2019). Economic analysis of heating for an enhanced geothermal system based on a simplified model in Yitong Basin, China. Energy Science and Engineering Vol 7, Issue 6, page 2658-2674.
- IGA, I. (2013). Handbook of Geothermal Exploration Best Practices: A Guide to Resource Data Collection, Analysis, and Presentation for Geothermal Projects.
- Ingeniería STRYCON S.A.S. (2018). Estudio de impacto ambiental proyecto geotérmico en el Macizo Volcánico del Ruiz – etapa exploratoria. Chec grupo EPM.

- Ingólfssdóttir & Gunnarsdóttir (2020). Tourism as a tool for nature conservation? Conflicting interests between renewable energy projects and wilderness protection in Iceland. *Journal of Outdoor Recreation and Tourism* Vol 29.
- Instituto geológico y minero de España (s.f.). Historia de la electricidad con geotermia. Link: <https://www.igme.es/Geotermia/La%20geotermia%20en%20el%20mundo.htm>
- Jaramillo, J. A., & Solano, J. (2019). Análisis de Riesgos en Proyectos de Generación de Energía en Colombia (1.a ed., Vol. 1). Universidad EAFIT. https://repository.eafit.edu.co/bitstream/handle/10784/14216/JorgeAndres_JaramilloBarra_JuanDavid_SolanoGomez_2019.pdf;jsessionid=BBD32729659F1376918E17860D46A861?sequence=2
- Jorquera, C. (2020). La Comisión Federal de Electricidad (CFE) lanza licitación por planta geotérmica de 25 MW en campo geotérmico Los Humeros, México. *Piensa en Geotermia*. Página oficial: <https://www.piensageotermia.com/cfe-lanza-licitacion-por-planta-geotermica-de-25-mw-en-campo-geotermico-los-humeros-mexico/>
- Kaya, E., Zarrouk, S., O'Sullivan M. (2011). Reinjection in geothermal fields: A review of worldwide experience. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15, 2011. Pág. 47-68.
- Knolle, H. (1998). UNA APLICACIÓN DEL TEOREMA DE FIELLER. 5.
- Konstantinos, P., Efthymiou, L., Michopoulos, A., Mavragani, A., Anđelković, A., Antolini, F., Bacic, M., Bajare, D., Baralis, M., Bogusz, W., Burlon, S., Figueira, J., Genç, M., Javed, S., Jurelionis, A., Koca, K., Rzyżyński, G., Urchueguia, J., Žlender, B. (2020). A review of the legal framework in shallow geothermal energy in selected European countries: Need for guidelines. *Renewable Energy*, Volume 147, Part 2, Pages 2556-2571.
- Kristmannsdóttir, H. & Ármannsson, H. (2003). Environmental aspects of geothermal energy utilization. *Geothermics* Volume 32, Issue 4-6, Pages 451-461.
- Lacourt, O. E. (2010). Análisis de Diversidad Alternativas de Generación Eléctrica fuentes Geotermiales en Chile (1.a ed., Vol. 1). Universidad de Chile.
- Landis, D. & Albert R. (2010). *Handbook of Ethnic conflict*. Springer, International and Cultural Psychology. 647 pp.
- Llopis, G., & Rodrigo, V. (2011). Guía de la Energía Geotérmica (1.a ed.). Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid. <https://www.fenercom.com/wp-content/uploads/2008/01/Guia-de-la-Energia-Geotermica-fenercom-2008.pdf>

Diseño de un modelo probabilístico para apoyar el estudio de incertidumbre y riesgo asociado a la ejecución del proyecto de Geotermia en Nereidas como ERNC en la región para CHEC S.A. E.S.P. BIC

- López, J. (2017). Proyecto geotérmico del macizo volcánico del Ruiz CHEC - Resumen geocientífico.
- Manzella, A., Bonciani, R., Allansdottir, A., Botteghia, S., Donatoa, A., Giamberinia, S., Lenzib, A., Pacib, M., Pellizzone, A., Scroccad, D. (2018). Environmental and social aspects of geothermal energy in Italy. *Geothermics*, Volume 72, Pages 232-248.
- Manzella, A., Serra, D., Cesari, G., Bargiacchi E., Cei M., Cerutti P., Conti P., Giudetti, G., Lupi, M., Vaccaro, M. (2019). Geothermal Energy Use, Country Update for Italy. European Geothermal Congress 2019.
- Marín, G. A., & Sánchez, A. M. A. (2017). Estado Actual de la Producción de Energía Geotérmica en Colombia (1.a ed., Vol. 1). UNAD. <https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/13221/1087995573.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Marzolf, N. (2014). Emprendimiento de la Energía Geotérmica en Colombia. Banco Interamericano de Desarrollo. Convenio ISAGEN - BID/JC. Colombia. Documento disponible en: [http://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/8DF8ADF1EE6B17D105257D3900619BBA/\\$FILE/Energia_Geotermica_Colombia.pdf](http://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/8DF8ADF1EE6B17D105257D3900619BBA/$FILE/Energia_Geotermica_Colombia.pdf).
- Mata, G. (1999). Cultivo Del Hongo Comestible Lentinula Edodes, Shiitake, En Paja De Trigo: Una Alternativa En La Utilización De La Energía Geotérmica En El Campo De Los Humeros Puebla.
- Matek, B. (2013). Promoting Geothermal Energy: Air Emissions Comparison and Externality Analysis. GEA (Geothermal Energy Association) Public report, pp. 19. Open File Report http://geoenergy.org/events/Air%20Emissions%20Comparison%20and%20Externality%20Analysis_Publication.pdf.
- Mejía, E., Rayo, L., Méndez, J., Echeverri, J. (2014). Geothermal Development in Colombia. Presented at “Short Course VI on Utilization of Low- and Medium-Enthalpy Geothermal Resources and Financial Aspects of Utilization”, organized by UNU-GTP and LaGeo, in Santa Tecla, El Salvador, March 23- 29, 2014. Documento disponible en: www.os.is/gogn/unu-gtp.../UNU-GTP-SC-18-07.pdf.
- MISE-MATTM - Italian Ministry of Economic Development and Ministry of the Environment and Protection of Land and Sea (2016). Guidelines for the utilization of geothermal

- resources of middle-high enthalpy (in Italian), 43 pp. Open File Report http://unmig.sviluppoeconomico.gov.it/unmig/agenda/upload/174_375.pdf.
- Monsalve, M., Rodríguez, G., Méndez, R., Bernal, N. (1998). Geology of the Well Nereidas 1, Nevado del Ruiz Volcano, Colombia. Geothermal Resources Council Transactions, Vol. 22, September 20-23, 1998.
- Morata, D., Carcelén, J. (2020). Geotermia: una enorme fuente energética bajo nuestros pies. Revista nueva minería y energía El camino hacia una minería verde junio 2020.
- Morín, E., & Le Moigne, J.-L. (2006). Inteligencia de la Complejidad Epistemología y Pragmática (3.a ed., Vol. 5). aube.
- Niknam, P., Talluri, L., Fiaschi, D., Manfrida, G. (2020). Gas purification process in a geothermal power plant with total reinjection designed for the Larderello área. Geothermics Volume 88.
- NTC, N. (2009). Norma Técnica ISO 31000. ISO. http://simudatsalud-risaralda.co/normatividad_inv9/normas_tecnicas/NTC-ISO31000_Gestion_del_riesgo.pdf
- Orellana, L. (2001). Estadística Descriptiva. 1(1), 64.
- Ortega, A. (2011). Farmacoeconomía. Sefh. <https://www.sefh.es/bibliotecavirtual/fhtomo1/cap211.pdf>
- Pastrana, E.J., Fernández, M.E., Mendoza, E., Hernández, C. (2005). Environmental framework for the development of the Los Humeros, Puebla, geothermal field. Geothermics Vol 18 3-17, 2005.
- Patel, S. (2018). CerroPabellón: Llevando la energía geotérmica a nuevas alturas. Power Vol 162 N° 9
- Pellizzone, A., Allansdottir, A., Franco, R., Muttonia, G., Manzella, A. (2015). Exploring public engagement with geothermal energy in southern Italy: A case study. Energy Policy, Volume 85, Pages 1-11
- Pellizzone, A., Allansdottir, A., Franco, R., Muttonia, G., Manzella, A. (2017). Geothermal energy and the public: A case study on deliberative citizens engagement in central Italy. Energy Policy, Volume 101, Pages 561-570.

Diseño de un modelo probabilístico para apoyar el estudio de incertidumbre y riesgo asociado a la ejecución del proyecto de Geotermia en Nereidas como ERNC en la región para CHEC S.A. E.S.P. BIC

- Prades, J. L. P., & Martínez, F. I. S. (2015). Métodos para la Evaluación Económica de Nuevas Prestaciones [Exploratoria, Universidad de Murcia]. https://www.sanidad.gob.es/estadEstudios/estadisticas/docs/metodos_evaluacion.pdf
- Presidencia de la República (2012). Ley de la Comisión Nacional para el Desarrollo de los pueblos Indígenas. Diario Oficial de la Federación. 10pp.
- Rangel, YO. (2000). The use of residual geothermal energy in an edible mushroom production plant, Los Humeros geothermal field (Mexico): Achievements and alternatives.
- Ratio, M.A., Gabo-Ratio, J.A., Fujimitsu, Y. (2020). Exploring public engagement and social acceptability of geothermal energy in the Philippines: A case study on the Makiling-Banahaw Geothermal Complex. *Geothermics* Vol 85.
- Renkampa, B., Haunssb, S., Wongsac, K., Ortegad, A., Casamadride, E. (2017). Competing coalitions: The politics of renewable energy and fossil fuels in Mexico, South Africa and Thailand. *Energy Research & Social Science* 34. Páginas 214-223.
- Ricaurte, J. P. B., & Pérez, S. P. (2015). ¿Los beneficios tributarios a las Fuentes No Convencionales de Energía Renovables (1.a ed.). Universidad Javeriana. <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/62207/Ley%201715%2C%20i mpacto%20de%20los%20beneficios%20tributarios.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Richter, A. (2012). French Alstom announces signing of turnkey geothermal power plant contract worth US\$38 million with CFE for the Los Humeros II Phase B plant in the state of Puebla, Mexico. Think Geoenergy, oficial web: <https://www.thinkgeoenergy.com/alstom-signs-38m-turnkey-contract-with-cfe-for-los-humeros-ii-phase-b-plant/>
- Richter, A. (2019). ENAP said to eye sale of stake in geothermal operator Geotérmica del Norte in Chile. Think Geoenergy link: <https://www.thinkgeoenergy.com/enap-said-to-eye-sale-of-stake-in-geothermal-operator-geotermica-del-norte-in-chile/>
- mRichter, A. (2020). Geothermal power generation project CAPEX for Chile estimated at \$4.4m/MW. Think Geoenergy link: <https://www.thinkgeoenergy.com/geothermal-power-generation-project-capex-for-chile-estimated-at-4-4m-mw/>
- Richter, A. (2020). Incentives for geothermal development to be reintroduced in Italy. Think Geoenergy link: <https://www.thinkgeoenergy.com/incentives-for-geothermal-development-to-be-reintroduced-in-italy/>

- Rincón, J. C. M. (2010). ANÁLISIS DEL AJUSTE, SENSIBILIDAD E INCERTIDUMBRE DE LOS PARÁMETROS DEL MODELO DEL SCS [Investigativa, Pontificia Universidad Javeriana].
<https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/7150/tesis371.pdf?sequence=1>
- Romagnoli, P., Arias, A., Barelli, A., Cei, M., Casini, M. (2010). An updated numerical model of the Larderello–Travale geothermal system, Italy. *Geothermics* Volume 39, Issue 4, Pages 292-313.
- Ruiz, Y., Manotas, D., & Ramírez, H. (2021). Análisis de opciones reales para la valoración financiera de proyectos de energía geotérmica en Colombia. *7(15)*, 14.
- Sabatelli, F., Mannari, M., Parri, R. (2009). Hydrogen sulfide and mercury abatement: Development and successful operation of AMIS technology. *Geothermal Resources Council Annual Meeting 2009; Reno, NV; United States. Enel Green Power.*
- Sala de prensa Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias (2018). INEEL inaugura el primer Sistema Demostrativo de Bomba de Calor Geotérmica (BCG). Gobierno de México. Información encontrada en: <https://www.ineel.mx/detalle-de-la-nota.html?id=1194>
- Salazar, M., Mora, A., Bonilla, A., Lugo, R., & Lugo, H. (2021). Análisis paramétrico de las centrales geotermoeléctricas: Vapor seco, cámara flash y ciclos híbridos. *1, 84(8)*, 9.
- Saldivia, M. (2013). Barreras de entrada a la Geotermia en Chile. Memoria (Licenciado en Ciencias Jurídicas y Sociales) Santiago, Chile: Universidad de Chile. Facultad de Derecho, 2013.
<http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/114500/desaldivia_m.pdf?sequence=1>
- Saldivia, M. (2018). Análisis de legislación comparada sobre energía geotérmica. Resumen ejecutivo – línea geotermia y sociedad. Chile, diciembre 2018.
- Sánchez, M., Magaly, A., Ramírez, M. (2015). Thermal Stimulation to Improve the Permeability of Geothermal Wells in Los Humeros Geothermal Field, Mexico. *Comisión Federal de Electricidad. Proceedings World Geothermal Congress 2015 Melbourne, Australia, 19-25.*
- Sánchez, P., Sielfeld, G., Van, B., Dobson, P., Fuentes, V., Reed, A., Palma, R., Morata, D. (2015). Geothermal barriers, policies and economics in Chile – Lessons for the Andes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* Volume 51 Pages 1390-1401.
- Santamaría, E. (2020). *Geothermal Energy Explained from a Geological View.* *1(1)*, 27.

Diseño de un modelo probabilístico para apoyar el estudio de incertidumbre y riesgo asociado a la ejecución del proyecto de Geotermia en Nereidas como ERNC en la región para CHEC S.A. E.S.P. BIC

- Santini, P. (2005). Modular Geothermal Plants in Italy: Technical Characteristics and Operation Results”, Proc. World Geothermal Congress 2005, Paper No. 1327, Int’l. Geothermal Ass’n., Antalya, Turkey, 2005.
- Sapag, N. & Sapag, R. (2008). Preparación evaluación de proyectos. Quinta edición. Mc Graw Hill
- Secretaría de Energía – SENER (2014). Energy Balance 2013. Subsecretaria de Planeación y Transición Energética, México 2014.
- Secretaria de medio ambiente y recursos naturales (2007). Residente regional de construcción de proyectos de transmisión y transformación del sureste. Delegación federal del estado de Puebla, 2007.
- SENER (2012). Metodología para valorar externalidades asociadas con la generación de electricidad en México. Secretaria de Energía. 8 pp.
- Setiyono, B., Setyawan, A., Susanto, J., Punto, E., Abdulrahman, W., Susangkiyono, A., Chandra, R., Delfa, Z. (2019). Considering Social Aspects of Geothermal Project: The Case of Social Mapping of Geothermal Project on Mount Ungaran. ICENIS, 2019. Web of Conferences 125.
- Testo, S. (2016). Fundamentos de la incertidumbre en las mediciones. <https://www.testotis.es/know-how/centro-de-conocimiento/fundamentos-de-la-incertidumbre-en-las-mediciones>
- Torres, J. F. R., & Luna, R. D. P. (2023). Delimitación de Áreas con Gradiente Geotérmico Anómalo (1.a ed., Vol. 1). <https://noesis.uis.edu.co/server/api/core/bitstreams/6baa9bd3-08cb-4466-bead-c2d8004b84b1/content>
- Tovar, R., Estrada, R., López, O. (2000). Study of the total gas content of geothermal fluids for two new 25 MW plants in Los Humeros, Puebla Mexico. Geothermics Vol 16 61-69, 2000.
- Trujillo S. & Dewhurst W. (2014). Reconnaissance Analysis of a Geothermal System within the Central Cordillera of Colombia: Nevado del Ruiz. Geothermal Resources Council Transactions, Vol. 38, 2014.
- Unidad de planeación minero-energética-UPME (2003). Utilización de la energía geotérmica.
- University of Siena (2008). Geostructural, hydrogeologic and environmental geochemistry study of the Mt. Amiata area (in Italian). Public Report for the Region of Tuscany, pp. 368. Open File Report <http://www.distrettoenergieinnovabili.it/der/s/geotermianews/atti-bandi->

- delibere-e-documenti/studi-e-statistiche/amiata-universita-disiena/Studio_UniSI_Amiata.pdf.
- Urzua, L., Cumming, W., Dobson, P. (2002). Apacheta, a New Geothermal Prospect in Northern Chile. Geothermal Resources Council 26. January 2002
- Vargas, S., Martínez, A., Ejderyan, O. (2020). Factors and dynamics of the social perception of geothermal energy: Case study of the Tolhuaca exploration project in Chile. *Geothermics* Vol 88.
- Vázquez, A. (2011). Situación actual y perspectivas de desarrollo en el campo geotérmico de Los Humeros, Puebla, Proceedings, XIX Mexican Geothermal Association, Los Humeros, Puebla, Mexico, 2011, Sept. 22-23.
- Veliz, K. (2017). Simulación de sistemas basado en el método Monte Carlo con Promodel para la evaluación del proceso de registro de denuncias de la Comisaría de Chosica (1.a ed., Vol. 6). FIA.
- Villadiego, D., Ortiz, S., & Cañas, J. E. (2021). Estudio de factibilidad de un proyecto de energía geotérmica en operaciones de crudo y gas en un campo de la cuenca de los Llanos Orientales. 9(1), 11.
- Villasmil, J. (2019). Modelo para la Gestión de Riesgos en Proyectos Ejecutados en Sitios Remotos por Contratistas Petroleras del Estado Zulia. 1(5), 12.
- Vivallo, P. (2017). Formulación y evaluación de proyectos: Manual para estudiantes. Documento PDF.
- Vivas, C. D. (2021). Caracterización de Pozos Petroleros Aprovechables para la Producción de Energía Geotérmica (2.a ed., Vol. 1). Fundación Universidad de América. <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/8398/1/802201-2021-I-GA.pdf>
- Wirawan, AY., Pramudihadi, EW., Nugroho, AS., Iswahyu, P., Tanbar, F. (2020). Feasibility analysis of the 55 MWe Gedongsongo geothermal power plant Project. AIP Conference Proceedings Vol 2245.
- Wolf, N. & Gabbay, A. (2015). Sarulla 330 MW geothermal project key success factors in development. Transactions - Geothermal Resources Council. Volume 39, Pages 907-912.
- Zapata, O. P., & Cárdenas, M. A. C. (2019). Geotermia en Colombia. 17.

Diseño de un modelo probabilístico para apoyar el estudio de incertidumbre y riesgo asociado a la ejecución del proyecto de Geotermia en Nereidas como ERNC en la región para CHEC S.A. E.S.P. BIC

Zenteno, K. M. (2022). Origen y evolución de los fluidos hidrotermales localizados en la caldera El Aguajito, Baja California Sur, México. (1.a ed.). CICESE. https://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1007/3665/1/tesis_Karina%20Montserrat%20Zenteno%20Gonzalez_31%20ene%202022.pdf