UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

"MODELO DE TOMA DE DECISIONES PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE PROYECTOS DE GENERACIÓN ELÉCTRICA MEDIANTE ENERGÍA GEOTÉRMICA: CASO ECUADOR"

Trabajo de titulación previo a la obtención del Título de Ingeniero Mecánico

Autor:

Fabián Alberto Flores González
Thuesman Humberto Montaño Ramón

Tutor del trabajo:

Ing. Fran Reinoso Avecillas

Cuenca, Junio 2016

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo Fabián Alberto Flores González, con documento de identificación N° 1104839939, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de grado intitulado: "MODELO DE TOMA DE DECISIONES PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE PROYECTOS DE GENERACIÓN ELÉCTRICA MEDIANTE ENERGÍA GEOTERMICA: CASO ECUADOR", mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Mecánico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

.....

Nombre: Fabián Alberto Flores González

Cédula: 1104839939

Fecha: 2016-06-08

Yo Thuesman Humberto Montaño Ramón, con documento de identificación N° 1104049273, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de grado intitulado: "MODELO DE TOMA DE DECISIONES PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE PROYECTOS DE GENERACIÓN ELÉCTRICA MEDIANTE ENERGÍA GEOTERMICA: CASO ECUADOR", mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Mecánico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

.....

Nombre: Thuesman Humberto Montaño Ramón

Cédula: 1104049273

Fecha: 2016-06-08

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, Fabián Alberto Flores González y Thuesman Humberto Montaño Ramón, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría, que no ha sido previamente presentado por ningún grado o calificación profesional y que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

Nombre: Fabián Alberto Flores González

Cédula: 110483993-9

Fecha: 2016-06-08

Nombre: Thuesman Humberto Montaño Ramón

Cédula: 110404927-3

Fecha: 2016-06-08

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Que el presente trabajo de titulación *"*MODELO DE TOMA DE DECISIONES PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE PROYECTOS DE GENERACIÓN ELÉCTRICA MEDIANTE ENERGÍA GEOTERMICA: CASO ECUADOR*"*, realizado por los estudiantes Fabián Alberto Flores González y Thuesman Humberto Montaño Ramón, fue dirigido por mi persona.

Fran Reinoso Avecillas

DEDICATORIA

El esfuerzo, sacrificio y tiempo invertido para el desarrollo de mi proyecto de titulación y de toda mi carrera se la dedico a mis padres, Vicente y Glorita, a mis hermanos, Diego y Cristian, y de manera especial a mi hermana Adrianita para que le sirva de ejemplo de dedicación y perseverancia de alcanzar sus propias metas. Y por último y no menos importante se lo dedico a mis queridos sobrinos, Gabriel, Santiago, Noe y Adam.

Fabián Flores

Dedico este presente trabajo de titulación, realizado con mucho esfuerzo y tiempo, que es el producto de los estudios como profesional para ser Ingeniero Mecánico, de manera especial, a mis padres Thuesman y Nila, quienes, con ejemplo y amor, han sido mi cimiento principal en la construcción de mi vida profesional y humana, mi padre que ha apoyado en mis decisiones y a mi madre que con dulzura me ha hecho un hombre de bien. A mí querida hermana Gloria y a mis abuelitos Gloria y Humberto, quienes me han sabido dar amor y ejemplo de perseverancia.

Thuesman Montaño

AGRADECIMIENTOS

Quiero a gradecer a mis padres, por el apoyo que siempre me brindaron, sus oraciones, también por darme los mejores consejos que ayudaron a formar mi carácter y convertirme en la persona que soy. A mis hermanos por esas palabras de aliento y apoyo moral que me dieron durante toda mi carrera universitaria. A mi primo Iván que fue como un hermano, compañero y amigo, que hizo que la estadía en esta ciudad sea un más familiar.

De manera especial a mi tutor Ing. Fran Reinoso por el esfuerzo, tiempo y la orientación brindada, ya que con sus conocimientos y guía hemos podido concluir con éxito este trabajo de titulación.

A mis profesores universitarios y agradecer de manera particular al Ing. Nelson Jara y al Eco. Fernando Vivar por el asesoramiento, enseñanza y buena voluntad para finalizar mi proyecto de titulación.

Gracias, Dios los bendiga.

Fabián Flores

Quiero agradecer el desarrollo del presente trabajo, primeramente, a mis padres quienes me han apoyado incondicionalmente en mis estudios, y de manera especial a mi padre quien ha sido mi ejemplo a seguir de un excelente profesional.

Expreso de manera singular mi agradecimiento a mi tutor de trabajo de grado el Ing. Fran Reinoso, por su tiempo invertido, esfuerzo y conocimientos impartidos para poder concluir con éxito el presente trabajo.

A mis profesores universitarios, y expresó de manera particular el agradecimiento al Ing. Nelson Jara, y al Eco. Fernando Vivar por su importante aporte en el desarrollo de este proyecto, el cual fue dado de manera desinteresada y de muy buena voluntad.

Thuesman Montaño

RESUMEN

El presente trabajo de titulación propone un modelo de toma de decisiones para la implementación de proyectos de generación eléctrica mediante el uso de energía geotérmica, caso de estudio: Ecuador. Se estudia aspectos tecnológicos, ambientales y económicos que intervienen en el costo total de la inversión del proyecto, y se analiza cada uno de los componentes relacionados con el proyecto geotérmico propuesto. Empleando la metodología de Dinámica de Sistemas, se analiza mediante un modelo de toma de decisiones el comportamiento del sistema de producción de energía eléctrica del Ecuador y la factibilidad de la inversión utilizando energía geotérmica, mediante escenarios realistas de acuerdo a la situación energética actual, con los cuales se llega a establecer los escenarios, en función de dos variables, económica (tasa de financiamiento) y ambiental (certificados de carbono). Cabe recalcar que actualmente no se ha realizado modelos de toma de decisiones dinámicos para implantación de plantas de generación eléctrica usando energía geotérmica.

Para estructurar el modelo, primeramente, se realizó una revisión bibliográfica para conocer los trabajos elaborados hasta la actualidad; para en lo posterior realizar entrevistas con personal capacitado en temas como: geotermia, energías renovables y financieros. Se emplea la herramienta computacional "Vensim", instrumento gráfico de creación de modelos de simulación que permite conceptualizar, documentar, simular, analizar y optimizar modelos de Dinámica de Sistemas. Este software nos permite entre otros aspectos, plantear escenarios, uno optimista y otro pesimista, teniendo la posibilidad de comparar estos escenarios con la situación actual, para ver cómo estos se comportarían a través del tiempo. Para el caso de rentabilidad de la inversión se realizó un procedimiento adicional, con ayuda de criterios económicos de Valor Actual Neto (VAN) y de la Tasa Interna de Retorno (TIR).

Una vez concluido y planteado el modelo, se obtuvieron los siguientes resultados: para un escenario optimista el costo total de inversión para proyectos geotérmicos fue de 132 millones de USD, mientras que para un escenario pesimista este costo sería de 146 millones de USD, ambos casos son para un yacimiento geotérmico con un potencial energético aprovechable de 44 MW. De acuerdo con los resultados del modelo, analizando los criterios económicos se obtuvo un valor positivo para el VAN y una TIR superior a la tasa de rentabilidad exigida para este proyecto, por lo que se afirma que la inversión es rentable.

ABSTRAC

This titration work proposes a decision-making model for implementing power generation projects using geothermal energy, case study: Ecuador. It is studied technological, environmental and economic aspects involved in the total cost of the project investment, and analyzed each of the components related to the proposed geothermal project. Employing the methodology of System Dynamics it is analyzed by a model decision-making behavior of the production system of electricity from Ecuador and the feasibility of investment using geothermal energy, through realistic scenarios according to the current energy situation, these scenarios are set in function of two variables, economic (financing rate) and environmental (carbon certificates). It is worth mentioning that currently has not been made dynamic models making decisions for implementation of power generation plants using geothermal energy.

To structure the model, first, a literature review was conducted to know the work carried out until now; for in later, conduct interviews with trained staff on topics such as geothermal energy, renewable energy and financial. Is used a Computational tool named "Vensim" that is a graphical instrument for creating simulation models for conceptualizing, document, simulate, analyze and optimize system dynamics models used. This software allows us among other things, raising scenarios, one optimistic and the other pessimistic, with the possibility to compare these scenarios with the current situation, to see how they behave over time. In the case of investment return an additional procedure was performed, using economic criteria Neto (NPV) Present Value and Internal Rate of Return (IRR).

Once completed and raised the model, the following results were obtained: for an optimistic scenario the total cost of investment for geothermal projects was 132 million USD, whereas a pessimistic scenario this cost would be 146 million USD, both cases they are for a geothermal reservoir with usable energy potential of 44 MW. According to the results of the model, analyzing the economic criteria a positive value for NPV and IRR exceeds the rate of return required for this project it was obtained, which states that the investment is profitable.

ÍNDICE

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR II

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD IV

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN V

DEDICATORIA VI

AGRADECIMIENTOS V

RESUMEN VI

ABSTRAC VII

ÍNDICE VIII

ÍNDICE DE FIGURAS X

ÍNDICE DE TABLAS XII

Capítulo 1. Introducción 1

1.1 Introducción. 1

1.2 Problema: 2

1.2.1 Antecedentes: 2

1.2.2 Definición del problema 3

1.2.3 Importancia y alcances 3

1.2.4 Delimitación 4

1.3 Objetivos 4

1.3.1 Objetivo General 4

1.3.2 Objetivos específicos 4

Capítulo 2. Marco Teórico 5

2.1 Diagnóstico de la situación actual de la energía en el Ecuador. 5

2.1.1 Oferta y demanda de la Energía en el Ecuador 6

2.1.2 Generación de energía eléctrica: 9

2.1.3 Energías renovables para generación eléctrica 11

2.1.4 Potencial geotérmico para fines de generación eléctrica en el Ecuador 12

2.1.5 Prospección de la demanda de energía para el Ecuador 13

2.2 Revisión de tecnologías para la generación de energía eléctrica mediante el uso de fuentes geotérmicas.....14

2.2.1 Principio y aplicaciones 14

2.2.2 Producción de electricidad a partir de la energía geotérmica 15

2.2.3 Yacimientos geotérmicos 16

2.2.4 Tipos de centrales eléctricas geotérmicas 18

2.2.5 Tipos de turbinas de vapor usadas.....23

2.3 Principios de Dinámica de Sistemas.....26

2.3.1 Diagrama causal 27

2.3.2 Diagramas de niveles y flujos 27

2.3.3 Evaluación del modelo 28

2.3.4 Validación del modelo.....28

2.3.5 Análisis del modelo 28

Capítulo 3. Planteamiento del modelo.....29

3.1 Variables de modelo.....29

3.1.1 Horizonte temporal del modelo.....29

3.1.2 Determinación de las Variables tecnológicas del modelo 29

3.1.3 Determinación de las Variables económicas del modelo 31

3.1.4 Determinación de las Variables ambientales del modelo.....33

3.2 Diagramas causales 36

3.2.1 Diagrama causal del modelo general 36

3.2.2 Diagrama causal de la variable tecnológica. 37

3.2.3 Diagrama causal de la variable Económica 38

3.2.4 Diagrama causal de la variable ambiental.....38

3.3 Criterios económicos para el modelo 39

3.3.1 Criterio de Valor Actual Neto (VAN) 39
3.3.2 Criterio de la Tasa Interna de Retorno (TIR) 39
3.4 Resultados de la simulación del estado actual 40
Capítulo 4. Resultados 42
4.1 Planteamiento de Escenarios 42
4.1.1 Escenario optimista 42
4.1.2 Escenario pesimista 43
4.2 Resultados de la simulación de los escenarios 43
4.3 Análisis de resultados obtenidos de la simulación de los escenarios 45
4.4 Resultados utilizando criterios económicos del VAN y TIR 46
Capítulo 5. Conclusiones 48
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 51
ANEXO A. Procedimiento de cálculo VAN y TIR 54
ANEXO B. Modelo Proyectos Geotérmicos para generación Eléctrica, usado Vensim ..55

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Evolución de la oferta de energía por fuentes 1970 – 2014. 5
Figura 2. Demanda de energía primaria y secundaria por fuente. 6
Figura 3. Balance total de energía del sistema energético ecuatoriano 7
Figura 4. Producción de energía a través de fuentes primarias del 2000 a 2014. 7
Figura 5. Estructura del consumo por fuente de energía. 8
Figura 6. Oferta y demanda a través de fuentes de energía secundaria de 2000 a 2014. 8
Figura 7. Estructura de generación eléctrica. 9
Figura 8. Consumo de electricidad por sector. 10
Figura 9. Fuentes de energía renovable usadas en Ecuador de 2004 a 2014. 11
Figura 10. Mapa Geotérmico Ecuador. 12
Figura 11. Evolución y Previsión del consumo Total del Sistema Nacional Interconectado 13
Figura 12 Yacimiento hidrotermal. 15

Figura 13. Centrales de vapor seco esquema funcional. 18
Figura 14. Diagrama de centrales de vapor seco. 19
Figura 15. Centrales de flash simple esquema. 20
Figura 16. Diagrama de centrales de flash simple. 20
Figura 17. Diagrama de centrales de flash simple. 21
Figura 18. Diagrama de centrales de flash doble. 21
Figura 19. Centrales de ciclo binario esquema. 22
Figura 20. Diagrama de centrales de ciclo binario. 22
Figura 21. Turbina de condensación. 24
Figura 22. Sección de turbina de condensación. 24
Figura 23. Turbina de contrapresión. 25
Figura 24. Turbina de condensación con extracción intermedia. 25
Figura 25. Bucle de realimentación positiva y negativa. 27
Figura 26. Diagrama de niveles y flujos. Elaboración propia 27
Figura 27 Costos de los certificados de carbono en el tiempo. 34
Figura 28 Evolución y previsión del consumo total de energía en el Ecuador 35
Figura 29. Diagrama causal del Modelo General 37
Figura 30. Diagrama causal que determina el Potencial Aprovechable del Yacimiento Geotérmico. 37
Figura 31. Diagrama causal que determina el costo de la planta. 38
Figura 32. Diagrama causal que determina el costo de emisiones evitadas de CO2 38
Figura 33. Costo total de inversión del proyecto geotérmico, situación actual. 40
Figura 34. Costo de Inversión de la Planta de Generación Geotérmica. 41
Figura 35. Costo de Operación y Mantenimiento de la Planta de Generación Geotérmica. 41
Figura 36. Costo de Transmisión Central de Generación a la subestación eléctrica 42
Figura 37. Cotos total inversión proyecto Geotérmico. 43
Figura 38. Costo de la Planta del Proyecto Geotermico. 44
Figura 39. Costo de emisiones evitadas de CO2. 45
Figura 40 Emisiones evitadas de CO2 al ambiente. 45
Figura 41. Tasa interna de retorno TIR vs., la capacidad del yacimiento geotérmico. 47
Figura 42. Valor actual Neto vs., la capacidad del yacimiento geotérmico. 48

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Balance de energía eléctrica. 9
Tabla 2. Generación de energía eléctrica. 10
Tabla 3. Estado Actual de la Geotermia en el Ecuador. Elaboración propia 13
Tabla 4. Comparación de tecnologías para la producción de energía eléctrica mediante energía geotérmica. Elaboración propia. 23
Tabla 5. Datos necesarios para el cálculo de flujo másico, gasto másico, y potencial bruto del yacimiento. 30
Tabla 6. Criterios de evaluación económica. Elaboración propia. 47

Capítulo 1. Introducción

1.1 Introducción.

La generación, planificación y sostenibilidad energética de un país es indispensable para su desarrollo; por ende, en el Ecuador se está avanzando mucho al respecto para obtener la soberanía energética con una idea principal que es el de "producir más, contaminando menos" y es justamente este fin el que ha impulsado a buscar nuevas, mejores y más eficientes formas de producción energética en el país, disminuir el consumo de materias primas no renovables y apostar por energías primarias renovables.

Todo esto nos ha llevado a buscar otras formas de generación eléctrica en el país como lo es la hidroelectricidad, la cual el gobierno nacional ha puesto especial atención para aprovechar este tipo de recurso, esto no es muy conveniente, sino que se está generando una dependencia de este tipo de energía. Por lo que otras fuentes renovables no convencionales de energía también pueden ser aprovechadas como lo son la eólica, solar, geotérmica, etc.

La energía geotérmica es aquella que subyace en las entrañas de la tierra, esta energía entre sus varias aplicaciones la más importante es la generación de energía eléctrica mediante la exploración, perforación, e intercambio de calor, existente entre las rocas del yacimiento geotérmico y el fluido de trabajo, que usualmente es agua, donde el fluido de trabajo se evapora y eleva su presión donde acciona una turbina, la cual a su vez mediante un generador produce energía eléctrica. Hasta el momento en el Ecuador se han identificado cuatro potenciales yacimientos geotérmicos con fines de generación de energía eléctrica, los cuales se encuentran en estudios de prefactibilidad, sumando entre todos ellos un potencial energético de más de 682 MW. Se analiza los yacimientos y tecnologías para generar energía eléctrica mediante este recurso, donde los yacimientos hidrotermales son los más abundantes y las plantas más usadas son las de simple flash conjunto de las turbinas de condensación.

Se plantea un modelo de toma de decisiones para la implementación de dichos proyectos de generación eléctrica, analizando aspectos como: tecnologías a aplicar en las plantas de generación, costos de inversión, operación y financiamiento, y aspectos ambientales; simulando su comportamiento en el tiempo de este tipo de variables. Además, se hace una valoración económica usando criterios económicos como el Valor Actual Neto VAN y la Tasa Interna de Retorno TIR

1.2 Problema:

1.2.1 Antecedentes:

La generación de energía eléctrica en el Ecuador tuvo sus inicios en la ciudad Loja para el año de 1897, donde se crea la Sociedad Sur Eléctrica. Nació con dos turbinas hidráulicas ubicadas sobre el rio Malacatos de 12 kW cada una, convirtiéndose así en la primera ciudad del Ecuador en contar con servicio eléctrico. [1] El 10 de mayo de 1950, se constituye la Empresa Eléctrica Zamora S.A., conformada por el I. Municipio de Loja (60% del capital social) y la Corporación de Fomento (40% del capital social). Esta empresa se convertiría a partir del 19 de marzo de 1973 en la Empresa Eléctrica Regional del Sur S.A. (EERSSA), que actualmente brinda su servicio en las provincias de Loja, Zamora Chinchipe y Morona. [1]

La generación eléctrica en 2014 se incrementó en 4,5%, lo que significa una producción de 15.070 kBEP (24.307 GWh). Para este año, la estructura de generación fue 47% hidráulica, 51% térmica y 2% de otras fuentes renovables correspondiente a eólica, solar y biomasa. En 2014, la capacidad efectiva instalada de generación eléctrica alcanzó un valor de 5299 MW. Es así que las centrales hidráulicas tuvieron una participación de 2.241 MW y las térmicas de 3011 MW, de los cuales 136 MW corresponden a generación con bagazo de caña. Por otro lado, la potencia efectiva instalada de centrales eólicas fue de 2,4 MW al 2012, de 20 MW al 2013 y 21 MW al 2014. De igual forma, la capacidad instalada de generación fotovoltaica ha tenido un incremento en el tiempo, pasando de 78 KW a 3,9 MW entre 2012 y 2013, alcanzando 26 MW en el 2014, lo cual muestra el importante incremento de la participación renovable no convencional en la matriz de generación eléctrica. [2]

El recurso geotérmico está siendo aprovechado a nivel mundial, dando uso a esta energía de manera directa (calefacción, balnearios, piscicultura, etc.) e indirecta (generación eléctrica). El Ecuador, al ser un país ubicado en el arco volcánico andino posee un gran potencial geotérmico, estimado en 1700 MW. [3] La identificación del recurso geotérmico en el Ecuador tuvo su inicio en el año de 1978 como parte de la investigación y exploración de recursos para generación eléctrica que impulso el desaparecido Instituto Ecuatoriano de Electrificación

(INECEL). La primera fase de reconocimiento nacional del recurso geotérmico se lo desarrolló en conjunto con la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE) y estuvo a cargo de la empresa Italiana Aquater y de la empresa Francesa BRGM. Una vez identificados los prospectos geotérmicos INECEL desarrolló los estudios de pre factibilidad de los proyectos Tufiño-Chiles, Chachinbiro y Chalupas. El primero de los mencionados al estar ubicado en la frontera con la República de Colombia, se constituyó en un proyecto de desarrollo binacional tras el acuerdo firmado por los presidentes de ambos países en marzo de 1982. La prefactibilidad del mencionado proyecto se lo desarrolló con un crédito no reembolsable otorgado por el gobierno de Italia y administrado por OLADE. El estudio se lo realizó en el lapso de tres años y medio (agosto 1984-diciembre 1987), pero sin llegar a realizar perforaciones en el sitio. [4]

1.2.2 Definición del problema

La falta de una metodología de toma de decisiones para la inversión de proyectos de generación eléctrica mediante energía geotérmica en Ecuador, y analizando la factibilidad del proyecto.

1.2.3 Importancia y alcances

La tendencia a nivel mundial para la generación de energía eléctrica hace énfasis en que el impacto ambiental sea lo más bajo posible, es decir, que la prioridad al momento de generar electricidad se use energías renovables y de contaminación ambiental mínimo, para reducir en gran medida el CO2 (Dióxido de Carbono) emitido a la atmosfera. Al momento no existe una diversificación en la canasta energética del Ecuador, para la generación eléctrica su puede observar en la figura número 7 que existe una alta dependencia de fuentes térmicas (49,13%) e hidráulicas (45,57%) para la producción de electricidad en nuestro país por lo que es necesario diversificar estas fuentes ya que por ejemplo las térmicas son recursos no renovables y emiten una gran cantidad de CO2 al ambiente mientras las hidráulicas son renovables, pero generan un impacto ambiental y son susceptibles a sequias.

Con estos antecedentes podemos decir que el uso de la energía geotérmica entra a suplir en gran medida la dependencia de hidroelectricidad, aportando con una fuente de energía renovable y de poco impacto ambiental, con una alta reducción de las emisiones de CO2. Por lo tanto, es importante aportar con un modelo para la toma decisiones de implementación en proyectos de generación eléctrica mediante energía geotérmica, y generar alternativas que beneficien a la población en general, contaminado menos y siendo más eficientes en generación de la energía.

La falta de una metodología que nos ayude o nos oriente de una manera más óptima para la evaluación de proyectos de energía renovables, hace que esta investigación tenga una gran importancia dentro del campo ingenieril, económico y ambiental. El hecho de generar un modelo para la implementación en energía geotérmica permite simular y estimar posibles escenarios los cuales, ahorran tiempo y dinero en la estimación del potencial que tendría este tipo de energía y sus posibles impactos que tendrán tanto en lo social, ambiental y económico.

La Dinámica de Sistemas es la herramienta más óptima para la realización de estas estimaciones ya que permite modelar sistemas y elementos dinámicos (cambiante en el tiempo) y hacer a la vez proyecciones con la ayuda de programas computacionales. Todo esto nos genera criterios mucho más reales y con errores aceptables sobre la posibilidad de inversión, los cuales facilitan un criterio más óptimo para invertir en la energía geotérmica.

1.2.4 Delimitación

El proyecto de investigación está delimitado geográficamente dentro del territorio ecuatoriano, dirigido hacia instituciones públicas como ministerios de energías y de sectores estratégicos.

En el caso particular del modelo de toma de decisiones, se consideran tres aspectos que delimitan nuestra investigación, que son: variables tecnológicas, variables ambientales y las variables económicas.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

- Plantear un modelo de toma de decisiones para la implementación de plantas de generación eléctrica con energía geotérmica.

1.3.2 Objetivos específicos

- Diagnosticar la situación actual de la energía geotérmica en el Ecuador
- Revisar las tecnologías existentes para la generación d|e energía eléctrica mediante el uso de energía geotérmica
- Analizar escenarios y plantear propuestas de implementación de plantas de generación de energía eléctrica mediante fuentes geotérmicas.

Capítulo 2. Marco Teórico

2.1 Diagnóstico de la situación actual de la energía en el Ecuador.

En esta sección se analizará el estado energético de la energía tanto primaria como secundaria en el Ecuador tomando como referencia el balance del año 2015, donde se explicará que ha ido evolucionando la energía en el ecuador.

La energía se produce de diferentes fuentes y es almacenada de distintas formas. Las fuentes se pueden clasificar en primarias y secundarias, según pueda obtenerse de ellas la energía directamente o sea necesario recurrir a otra fuente. Así, por ejemplo, la energía eléctrica es una fuente secundaria de energía, porque para su producción es necesario recurrir a otra fuente de energía.[5]

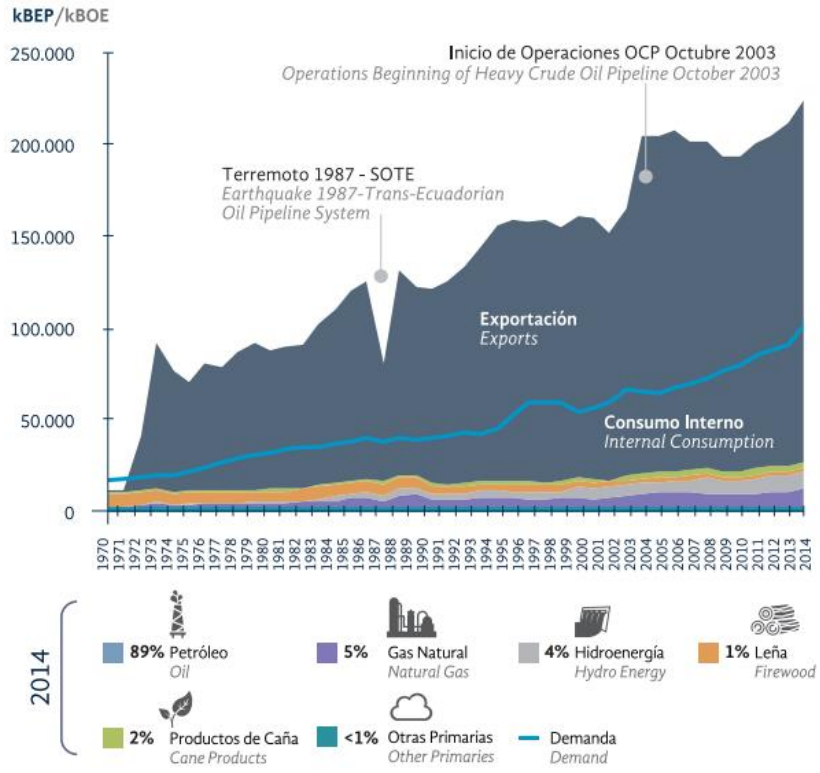


Figura 1. Evolución de la oferta de energía por fuentes 1970 – 2014. [2]

2.1.1 Oferta y demanda de la Energía en el Ecuador

La matriz energética del Ecuador a diciembre del 2014, validada por las fuentes oficiales del sector energético ecuatoriano. El Balance Energético Nacional para el año 2015 contabiliza los flujos de energía en cada etapa de las cadenas que componen la matriz energética del país, considerando la producción, transformación, transporte o transmisión, distribución y consumo de energía. Esta información permite analizar las tendencias históricas del sector, lo cual es la base para la planificación y la implementación de políticas destinadas a la optimización de recursos y proyectos, para satisfacer las necesidades de la sociedad bajo un enfoque de sostenibilidad. [2]

En la figura 2; se observa que la energía renovable (hidroenergía, leña y productos de caña) tiene una participación mayor al 6% en la matriz de producción de energía primaria al 2014. Mientras que el petróleo sigue siendo la principal fuente de energía primaria.[2]

El 83% de la demanda de energía proviene de fuentes fósiles. El 31% de la energía consumida en el país es en forma de diésel. El consumo de gasolinas representa el 28% del total de energía demandada, y el 14% del consumo corresponde a electricidad. [2]

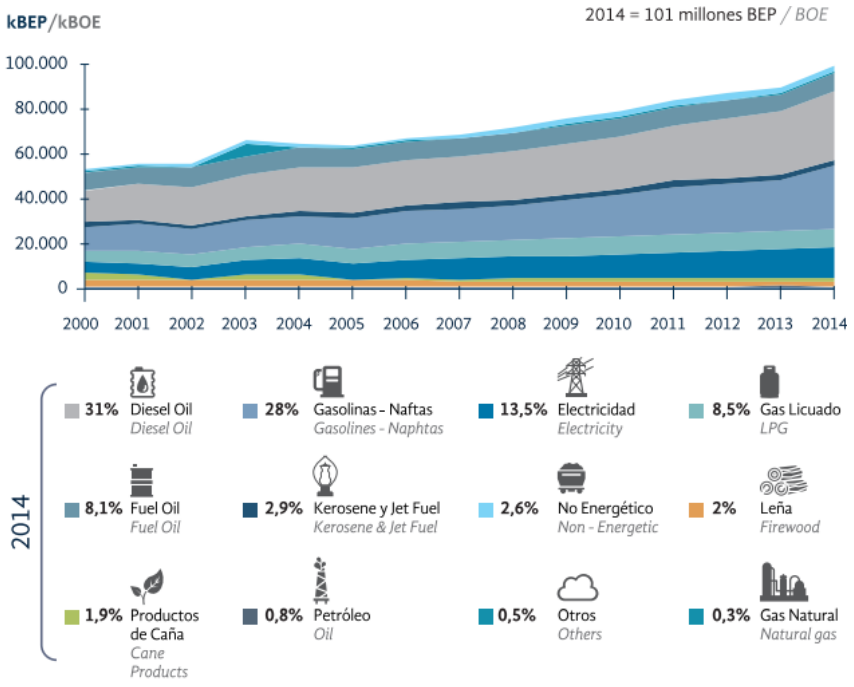


Figura 2. Demanda de energía primaria y secundaria por fuente. [2]

La figura 3; se muestra un balance total de energía que consume, produce e importa el Ecuador, donde no se especifica si es energía primaria o energía secundaria, sino que es la total de todo esto. La unidad de medida para este balance es los miles de barriles de petróleo equivalente (kBEP).

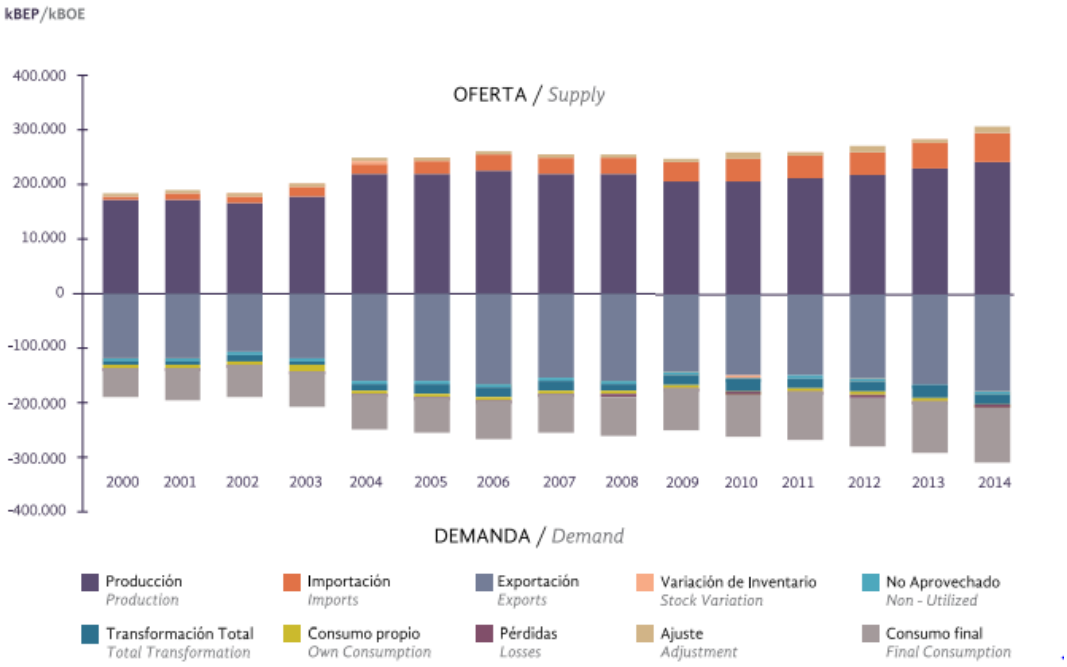


Figura 3. Balance total de energía del sistema energético ecuatoriano [2]

En la figura 4; muestra la producción de energía primaria, donde consta: el petróleo, gas natural, hidroenergía, leña, productos de caña y otras primarias (eólica, fotovoltaica).

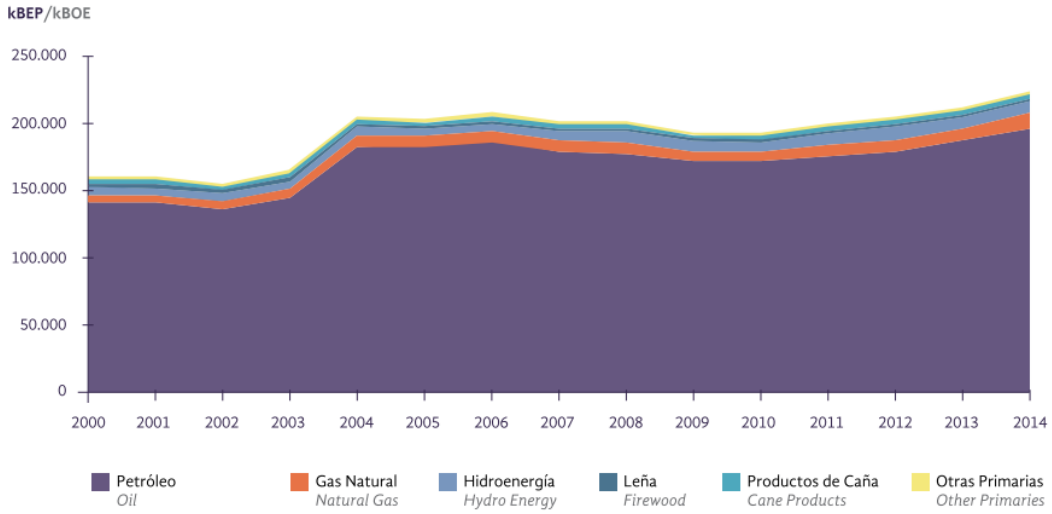


Figura 4. Producción de energía a través de fuentes primarias del 2000 a 2014. [2]

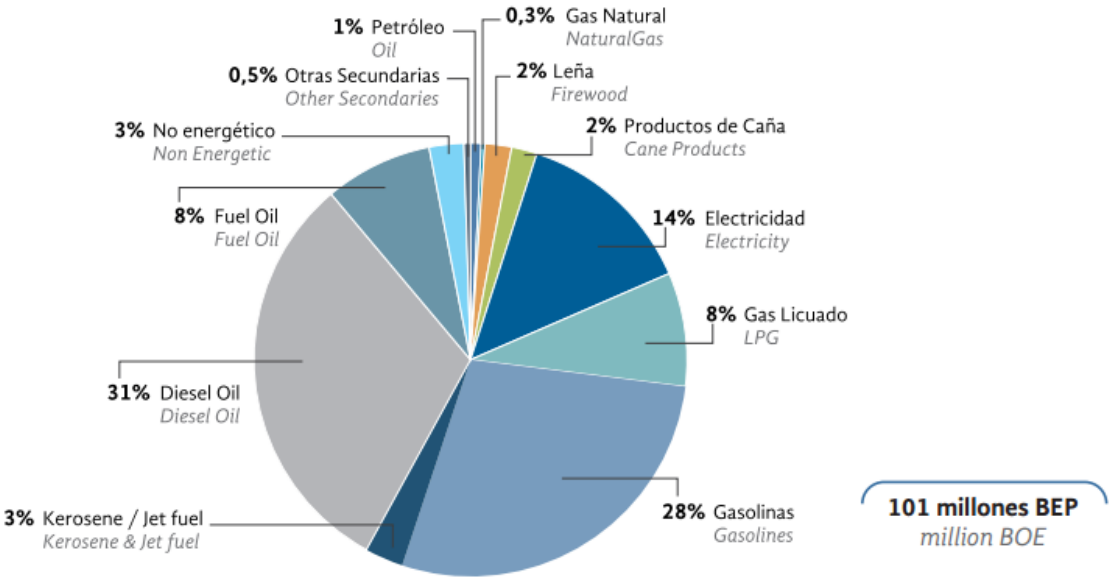


Figura 5. Estructura del consumo por fuente de energía. [2]

Se puede observar que en la figura 5; el consumo de electricidad en nuestro país es del 14 % del total de energía usada en nuestro país, donde entre otras se puede ver que los combustibles siguen siendo el mayor gasto de nuestro país.

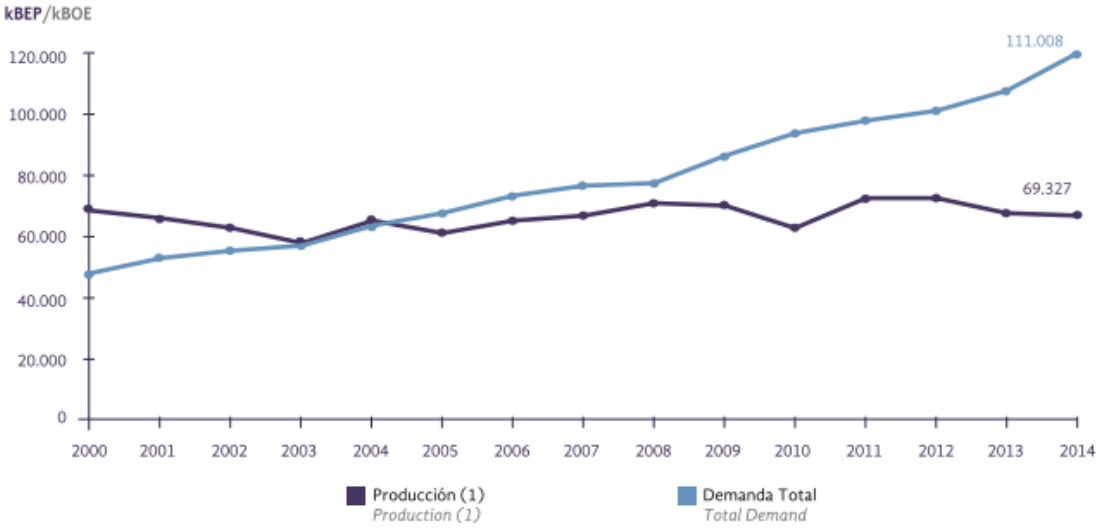


Figura 6. Oferta y demanda a través de fuentes de energía secundaria de 2000 a 2014.[2]

2.1.2 Generación de energía eléctrica:

La tabla 1; muestra el balance de la energía eléctrica en nuestro país con cierre en el año 2014 donde se detalla la energía generada bruta, la energía importada desde Colombia y Perú, desde el año 2009. Con lo que se puede ver un crecimiento durante los últimos años así como se ha disminuido un poco la energía importada desde Perú, por razones que en los últimos años se han puesto en marcha las nuevas centrales y además se espera que entren en funcionamiento las demás centrales eléctricas que están implementándose en el país para dejar de importar energía eléctrica de países vecinos.

La exportación de electricidad incrementó de 12 GWh en 2012 a 29 GWh en 2013, alcanzando en 2014 los 47 GWh. Además, entre 2013 y 2014

Tabla 1. Balance de energía eléctrica. [2]

Balance de energía eléctrica (GWh)						
Concepto / *Concept*	**2009**	**2010**	**2011**	**2012**	**2013**	**2014**
Energía Generada Bruta *Gross generated energy*	18.265	19.510	20.544	22.848	23.259	24.307
Energía Importada desde Colombia *Energy imported from Colombia*	1.058	795	1.295	236	662	824
Energía Importada desde Perú *Energy imported from Peru*	62	78	-	2	-	13
Energía bruta total *Total gross Energy*	19.385	20.383	21.893	23.086	23.921	25.144

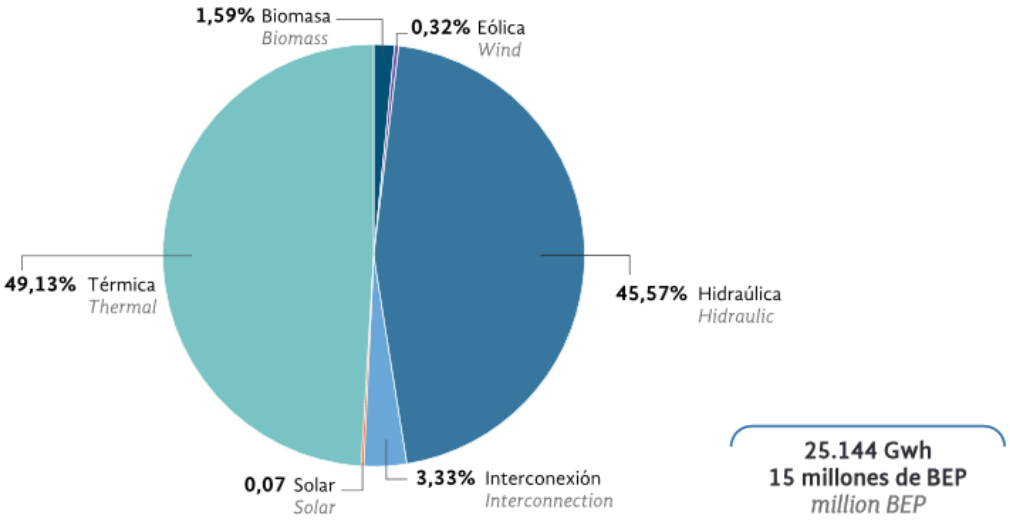


Figura 7. Estructura de generación eléctrica. [2]

Para el consumo de electricidad por sector, referenciamos la figura 8; el cual indica un alto porcentaje de uso por parte de la industria (43%), en el ámbito residencial el gasto es de 32%, y en el comercial se usa un 25% de esta energía.

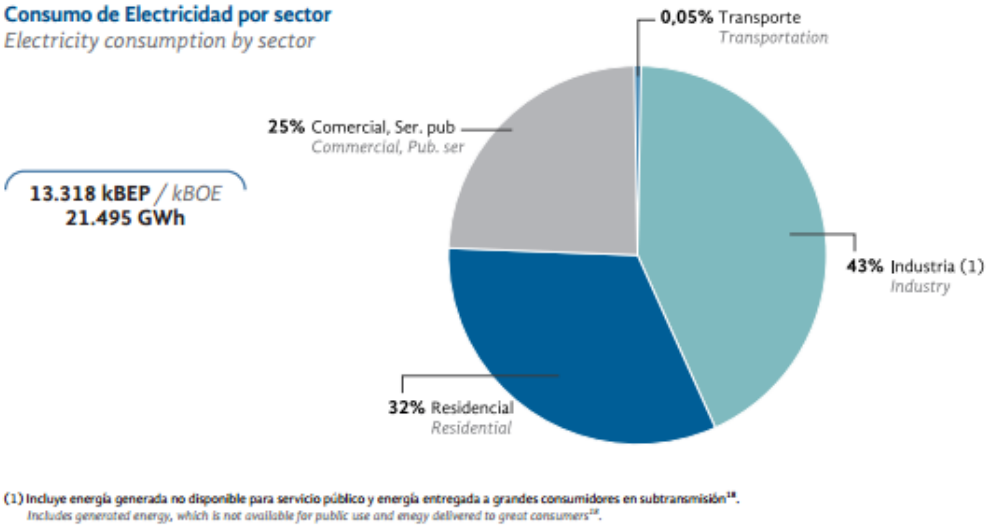


Figura 8. Consumo de electricidad por sector. [2]

En la tabla 2; se muestra la producción de electricidad durante los años 2009 al año 2014 donde podemos apreciar que las energías renovables no convencionales (no hidráulicas) han tenido un crecimiento considerable tomando en cuenta que la biomasa es la que más se ha venido produciendo y para el año 2014 ya contamos con fuentes como la solar y un crecimiento mucho mayor en la eólica.

Tabla 2. Generación de energía eléctrica. [2]

Generación de energía eléctrica (GWh)								
		2009	**2010**	**2011**	**2012**	**2013**	**2014**	**Estruc. % 2014**
Hidráulica		9,225	8,636	11,133	12,238	11,039	11,458	46
Térmica		8,819	10,634	9,129	10,311	11,865	12,354	49
OTRAS RENOVABLES	Biomasa	217	236	278	296	296	399	2
	Eólica	3	3	3	2	57	80	0
	Solar	0	0	0	0	4	16	0
	Total	220	239	282	299	356	496	2
Interconexión		1,121	873	1,295	238	662	837	3
TOTAL		19,385	20,383	21,839	23,086	23,923	25,144	100

2.1.3 Energías renovables para generación eléctrica

En el caso de energías renovables no convencionales podemos observar en la figura 9; que únicamente existen dos tipos principales para generación eléctrica, que ya se encuentran instaladas y en funcionamiento en nuestro país que son la eólica y la solar. Se puede apreciar que su producción es mínima pero ya marca un camino hacia otras fuentes de energía renovable que se podrían ir aplicando en nuestro país como es el caso de la Geotermia.

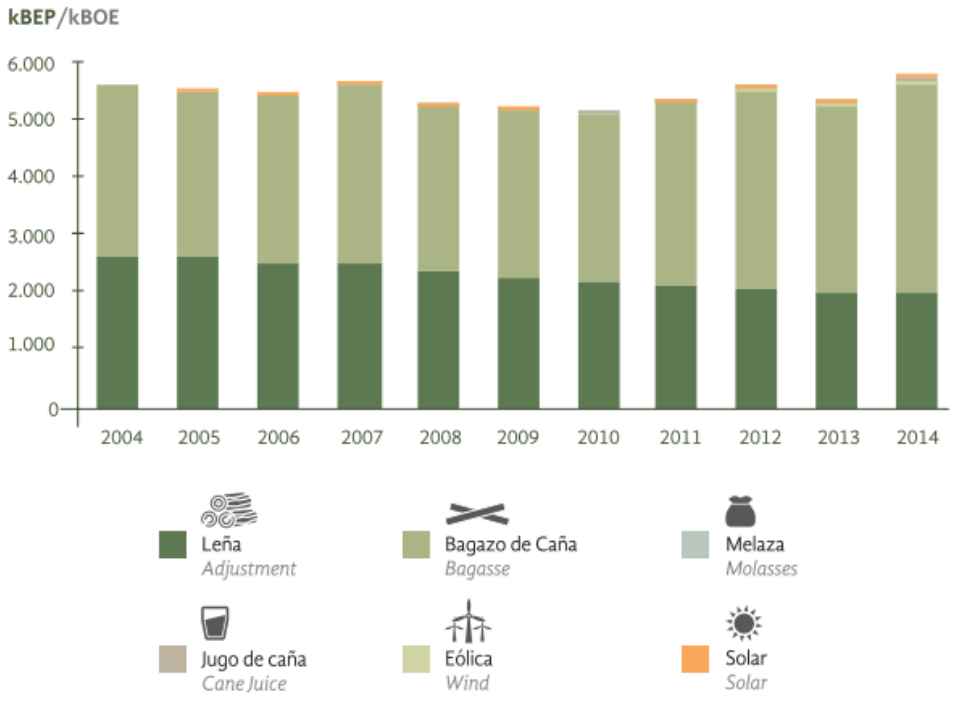


Figura 9. Fuentes de energía renovable usadas en Ecuador de 2004 a 2014. [2]

La energía eólica y solar fotovoltaica representan el 1,1% de la producción de Energías Renovables No Convencionales (ERNC). Generaron 79,7 GWh/año y 16,5 GWh/año de electricidad respectivamente. La potencia instalada eólica fue de 21,2 MW al 2014; y la potencia instalada solar fotovoltaica fue de 26,4 MW. [2]

2.1.4 Potencial geotérmico para fines de generación eléctrica en el Ecuador

El Ministerio de Coordinación de los Sectores Estratégicos muestra los avances que se viene dando en cuanto a energía geotérmica, para lo cual se ha elaborado una tabla resumen que se muestra a continuación donde se puede apreciar que existen 4 proyectos de generación geotérmica para el Ecuador con un potencial total estimado en 682 MW, de los cual dos están en estudios de prefactibilidad y los otros dos ya se encuentran en estudios de básicos y de prospección.

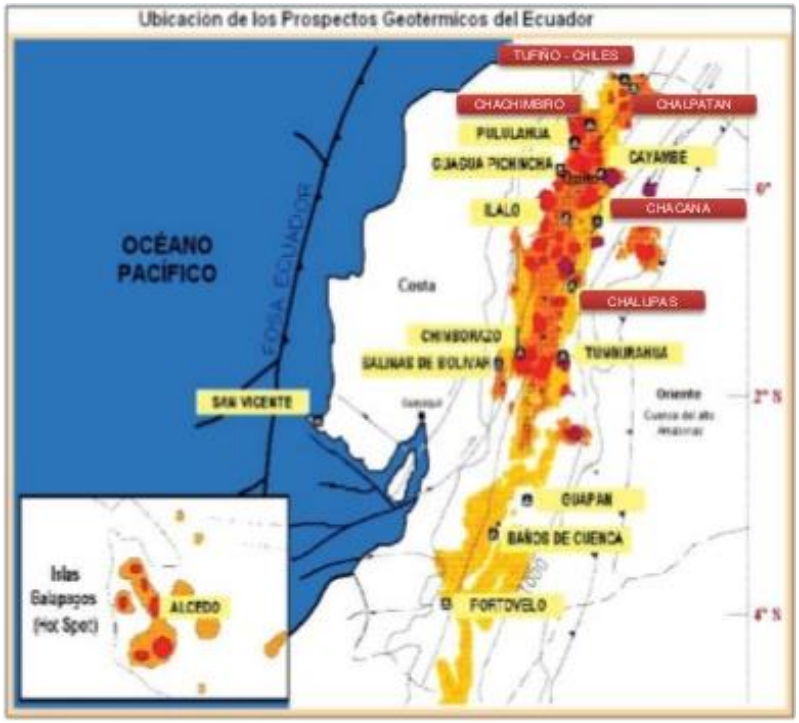


Figura 10. Mapa Geotérmico Ecuador. [6]

El mapa geotérmico del Ecuador se muestra en la gráfica 10; donde se resalta de color rojo las zonas de interés de aprovechamiento geotérmico con fines de generación eléctrica, de los cuales son cuatro, que se encuentran actualmente unos, en estudios de prefactibilidad, y otros en estudios básicos y de prospección, detallados en la tabla 3.

Tabla 3. Estado Actual de la Geotermia en el Ecuador. Elaboración propia

Estado Actual de la Geotermia en el Ecuador				
Nombre	**Localización-Provincia**	**Inversión**	**Estado actual**	**Potencial energético (MW)**
Chacana	Napo	$ 185,000.00	Prefactibilidad	438
Chachimbiro	Imbabura	$ 162,500.00	Prefactibilidad	130
Chalpatan	Carchi	$ 175,000.00	Estudios Básicos y de prospección	--
Tufiño-Chiles-Cerro Negro	Carchi-Nariño	$ 150,000.00	Estudios Básicos y de prospección	114
Total		$ 672,500.00		682

2.1.5 Prospección de la demanda de energía para el Ecuador

Para la prospección en nuestro país se toma en cuenta el análisis realizado por el Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, en el cual hace proyecciones planteando tres posibles escenarios del consumo de la energía para el Ecuador, de la figura 11; se puede observar que, el consumo para el año 2021 por ejemplo será de 30 913 GWh, y para el año 2030 tendremos un consumo de energía eléctrica de 57,492 GWh

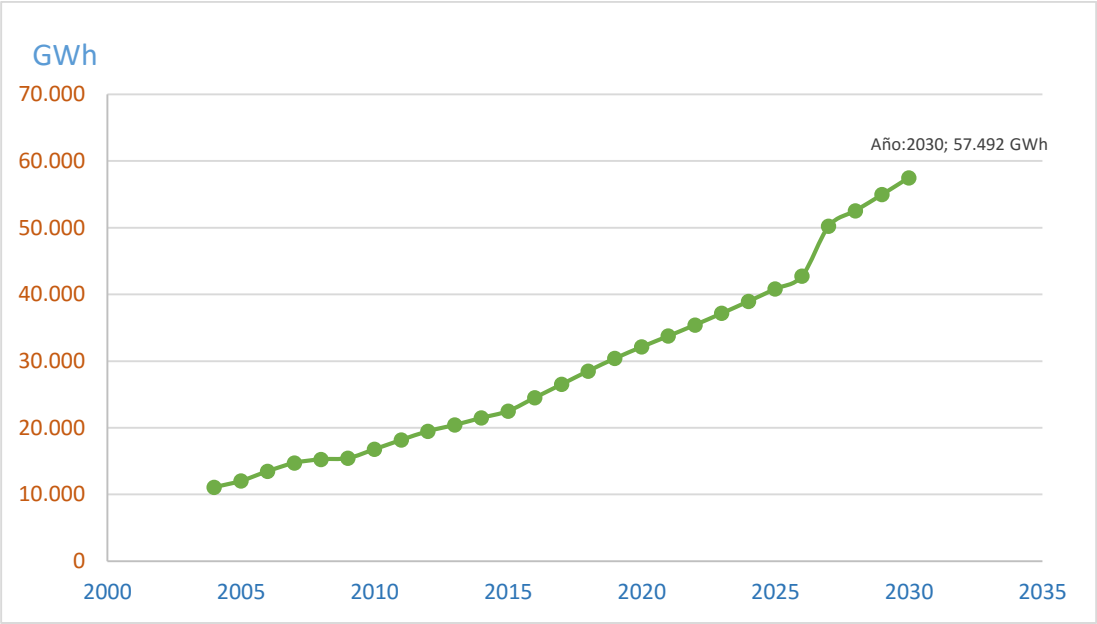


Figura 11. Evolución y Previsión del consumo Total (GWh) del Sistema Nacional Interconectado. [2]

2.2 Revisión de tecnologías para la generación de energía eléctrica mediante el uso de fuentes geotérmicas

En esta sección se tratará el principio de la energía geotérmica, como está estructurada y como es el principio básico fundamental para aprovechar su energía; la energía geotérmica tiene diversas aplicaciones, en este subcapítulo se revisa brevemente algunas de sus aplicaciones, recalcando que la más importante en este caso es el aprovechamiento de esta energía para la generación de electricidad.

Se analiza dentro de esta sección las tecnologías usadas para la generación de energía eléctrica mediante el uso de fuentes geotérmicas, se resalta el análisis de los tipos de centrales de generación eléctrica mediante el aprovechamiento de energía geotérmica, en la cual se revisan las más usadas a nivel mundial; se realiza también una revisión de las turbinas de vapor usadas para convertir energía mecánica en energía eléctrica.

2.2.1 Principio y aplicaciones

La energía geotérmica es aquella que subyace en las entrañas de la Tierra, la cual mediante técnicas de perforación e intercambio de calor puede aprovecharse para la producción de energía eléctrica cuando se dispone de temperaturas superiores a 150 °C, con temperaturas más bajas puede ser aprovechada para la industria, calefacción y refrigeración de ambientes. [6]

El gradiente geotérmico expresa el aumento de la temperatura con la profundidad en la corteza terrestre. Abajo en las profundidades accesibles mediante la perforación con la tecnología moderna (es decir, más de 10000 m) la pendiente media geotérmica es de aproximadamente 2.5 a 3 ° C / 100 m. La generación de electricidad es la forma más importante de la utilización de los recursos geotérmicos de alta temperatura (150 ° C). Los recursos de mediano a baja temperatura (<150 ° C) se adaptan a diferentes tipos de aplicación. [3]

La totalidad de la corteza terrestre del planeta constituye un extenso almacén de recursos geotérmicos de muy baja temperatura (< 30ºC), siendo recursos abundantes, versátiles y apropiados para diferentes tipos de utilización. Otra gran ventaja de este tipo de sistemas es que las condiciones geológicas para su aprovechamiento son poco exigentes, por lo que prácticamente en cualquier punto de la superficie del planeta se puede captar y aprovechar el calor almacenado en las capas superficiales del subsuelo, a pocos metros de profundidad (aproximadamente a unos 15m), debido en gran medida a la enorme inercia

térmica de los materiales geológicos que componen la corteza, la temperatura permanece estable (zona neutra), entre 7ºC y hasta 22ºC. El calor geotérmico se utiliza directamente o través de bombas geotérmicas (en masas de agua o acuíferos poco profundos), sin la participación de una central eléctrica, para una variedad de aplicaciones tales como calefacción, refrigeración, preparación de alimentos, baño de aguas termales, agricultura, acuacultura, invernaderos, entre otros. Es una alternativa válida para procesos de generación de calor y refrigeración en especial para la climatización de los edificios. Actualmente son varios los países que utilizan el calor geotérmico en procesos industriales, agrícolas y de ambientación entre los principales se tiene a Rusia, Hungría, Nueva Zelanda, EE.UU e Islandia, siendo este último el país con mayor actividad geotérmica del mundo, el 99% de las viviendas utilizan la energía geotérmica para calefacción. [7]

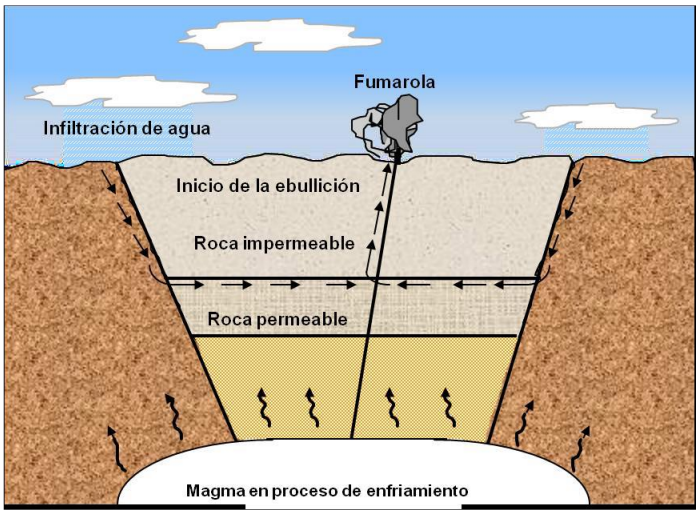


Figura 12 Yacimiento hidrotermal.[8]

2.2.2 Producción de electricidad a partir de la energía geotérmica

La generación de electricidad tiene lugar principalmente en las turbinas de vapor convencionales y plantas binarias, en función de las características del recurso geotérmico. Turbinas de vapor convencionales requieren fluidos a temperaturas de al menos 150 ° C, y están disponibles con la atmósfera (contrapresión) o condensación de los tubos de escape. Turbinas de descarga atmosférica son más simples y más baratas. El vapor de agua, directamente desde los pozos de vapor seco o, después de la separación, desde pozos húmedos, se hace pasar a través de una turbina y expulsado a la atmósfera. Con este tipo de unidad, el consumo de vapor (de la misma presión de entrada) por kilovatio-hora producido es casi el doble que el de una unidad de condensación. Sin embargo, las turbinas de descarga atmosférica son extremadamente útiles como plantas piloto o stand-by plantas, en el caso de los pequeños suministros de pozos aislados, y para la generación de electricidad a partir de pozos de prueba durante el desarrollo del campo. La tecnología de plantas binarias es un muy rentable y fiable mediante la conversión

en electricidad la energía disponible de campos geotérmicos, dominada por el agua (está por debajo de 170 ° C). [3]

2.2.3 Yacimientos geotérmicos

Espacio físico en el interior de la corteza terrestre con unas determinadas condiciones geológicas, en el que se sitúa un recurso geotérmico cuya explotación es económicamente viable. Los yacimientos geotérmicos pueden clasificarse según diferentes criterios: contexto geológico, nivel de temperatura, modo de explotación y tipo de utilización. Lo habitual es clasificarlos en función del nivel térmico de los fluidos que contienen, es decir, de los recursos que albergan, adoptándose los mismos intervalos de temperatura considerados para éstos. [9]

2.2.3.1 Clasificación de los yacimientos geotérmicos según su temperatura

a) Yacimientos de alta entalpía: en los que el fluido se encuentra en condiciones de presión y alta temperatura por lo general supera los 150°C.
b) Yacimientos de media entalpía: en los que el fluido se encuentra a temperaturas entre 100 y 150ºC.
c) Yacimientos de baja entalpía: en los que la temperatura del fluido varía entre 30 y 100 ºC.[9]

Hay que considerar los yacimientos geotérmicos no convencionales, que constituyen casos singulares de los yacimientos de alta entalpía (temperaturas mayores a 150ºC).

2.2.3.2 Clasificación de los yacimientos útiles para la generación de energía eléctrica

a) Yacimientos hidrotermales

Estos yacimientos son los más comunes usados para la generación de energía eléctrica. Formados por una fuente de calor, agua (en estado líquido, en forma de vapor, o una mezcla de líquido y vapor) y la roca donde se almacena el fluido, estos sistemas se encuentran situados a una profundidad relativamente pequeña alrededor de 500m a 10km. La recarga del agua tiene su origen en la superficie de la tierra en forma de lluvia, hielo o nieve, atravesará la corteza terrestre por medio de fracturas y fallas, donde será expuesta a un foco de calor y previamente calentada por medio de la roca, bajo un sellamiento impermeable, garantizando así un elevado flujo térmico de hasta 400°C. En la figura 12 se puede observar la estructura básica de un yacimiento hidrotermal. Estos sistemas hidrotermales, que en la actualidad se explotan comercialmente para la generación eléctrica y usos directos, se clasifican de acuerdo con la recarga de agua en:

i. Vapor dominante, predominancia de vapor seco, son sistemas de alta entalpía que producen vapor sobrecalentado en un grado que varía entre los 0-50ºC. Permiten obtener mejor rendimiento en las turbinas generadoras de electricidad.
ii. Líquido dominante (alta entalpía), Sistemas de alta entalpía con temperaturas entre 150ºC y más de 300ºC.Tienen correlación con aparatos volcánicos y la tectónica de placas. Son más abundantes que los anteriores, por ejemplo: Cerro Prieto (México), Wairakei (Nueva Zelanda), Tiwi (Filipinas).
iii. Líquido dominante (baja entalpía), Sistemas de baja entalpía con temperaturas menores a los 150ºC aproximadamente. Son más abundantes que los de alta entalpía en una proporción de 10 a 1, se encuentran en casi todos los países del mundo, por ejemplo: Heber (Estados Unidos), Yangbajin (China). A estos dos últimos sistemas también se les conoce como vapor húmedo siendo los más comunes y de mayor aprovechamiento. [7]

b) Yacimientos de roca caliente seca (HDR: Hot Dry Rock)

Estos yacimientos son también uno de los más comunes para la generación de energía eléctrica. Creados, mediante la acción del hombre, en materiales geológicos de escasa o nula permeabilidad y/o porosidad existente en condiciones de alta temperatura y a profundidades no muy elevadas, carentes de fluido. Las técnicas empleadas persiguen la creación, en el macizo de roca profundo y caliente, de una red de fracturas que permitan la formación de una zona de intercambio térmico –almacén artificial–, por la que se hace circular un fluido inyectado desde la superficie, que retorna a ésta con un elevado incremento de su temperatura. La fracturación se consigue inyectando, a través de un pozo, grandes volúmenes de agua a elevada presión, en un proceso denominado hidrofracturación o fracturación hidráulica, usado frecuentemente en la producción de petróleo y gas. La distribución en profundidad del sistema de fracturas creado puede modelizarse usando métodos sísmicos de prospección geofísica, al objeto de determinar la ubicación del pozo de extracción del agua caliente, que se enviará a una central de ciclo binario para la producción de energía eléctrica y posteriormente se reinyectará en el yacimiento.[9]

c) Yacimientos geotérmicos geopresurizados

Se encuentran situados en áreas con gradiente geotérmico normal a una profundidad de alrededor de 3-6Km. La temperatura oscila entre 90-150ºC. En estos sistemas se puede encontrar energía almacenada en tres formas: energía hidráulica (presión alta), energía química (presencia de metano) y energía térmica (fluido caliente). No se explotan comercialmente en la actualidad, pero son ampliamente investigados y se espera un gran aprovechamiento en el futuro. [7]

d) Yacimientos marinos

Sistemas de alta entalpía presentes en el fondo del mar, en la actualidad no se explotan comercialmente y hasta ahora han sido poco estudiados. [7]

e) Yacimientos magmáticos

Sistemas constituidos por roca fundida existentes en aparatos volcánicos activos o a gran profundidad en zonas de debilidad cortical. No son fácilmente accesibles. Posiblemente el atractivo más importante de este tipo de recurso sean las altísimas temperaturas disponibles (≥800°C). En la actualidad no se explotan comercialmente. [7]

2.2.4 Tipos de centrales eléctricas geotérmicas

Las centrales eléctricas geotérmicas basan su funcionamiento en la turbina de vapor y el ciclo Rankine y, dentro de las múltiples posibilidades, adoptan la tecnología más adecuada al recurso energético disponible, en las condiciones de la boca del pozo, a fin de optimizar el aprovechamiento de la energía disponible y la inversión económica. La inmensa mayoría de centrales existentes en el mundo pueden incluirse en una de las categorías tipificadas a continuación. [10]

2.2.4.1 Centrales de vapor seco

Cuando un pozo suministra vapor en estado de saturación o bien ligeramente recalentado, suele decirse que produce vapor seco; este vapor puede conducirse directamente a la turbina de vapor para generar electricidad. Suele adoptarse este tipo de central cuando la temperatura es superior a los 200ºC.

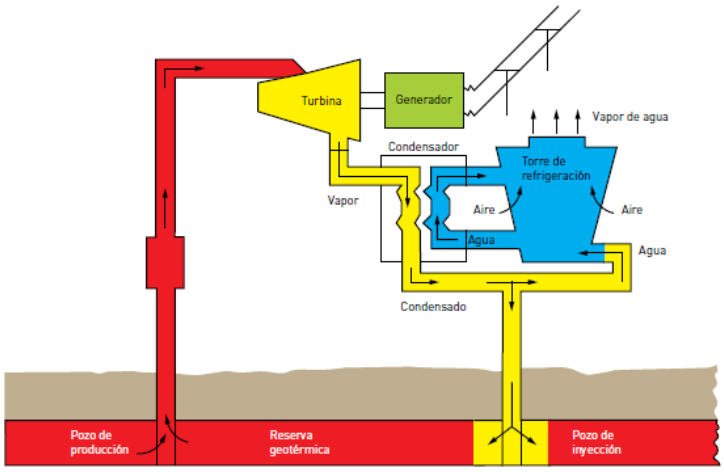


Figura 13. Centrales de vapor seco esquema funcional. [9]

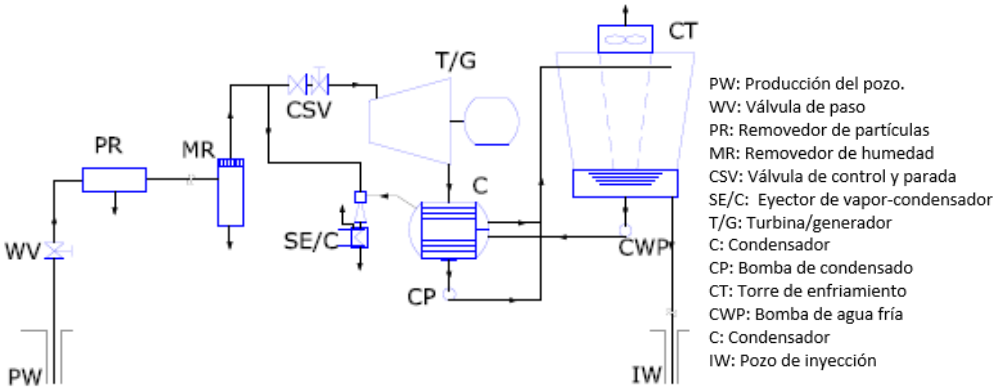


Figura 14. Diagrama de centrales de vapor seco. [7]

La figura 13 y 14; muestran esquemáticamente el funcionamiento de una central geotermal de vapor seco, la que consiste en la obtención del vapor desde la roca subterránea, a través de un ducto de succión, y su inyección directa en una turbina de vapor. El vapor se expande en la turbina haciendo girar su eje, que está conectado al eje del generador, produciendo de esta forma electricidad. El vapor expandido se retoma a la salida de la turbina, se condensa se traslada a una torre de enfriamiento para luego ser reinyectado.

2.2.4.2 Centrales de flash simple

Las centrales con tecnología simple flash son el pilar de la industria de energía geotérmica. Este tipo de centrales son generalmente instaladas cuando el yacimiento geotérmico está constituido principalmente por líquido dominante. A mayo de 2007 había 159 unidades de este tipo en funcionamiento en 18 países de todo el mundo. Las centrales simples flash representan alrededor del 32 % de todas las centrales geotérmicas y constituyen más del 42 % de la capacidad total instalada de energía geotérmica en el mundo. La potencia alcanzada por estas centrales varía entre los 3 y 90 [MW] por unidad, con un promedio de 25 [MW] por unidad. Una central simple-flash típica de 30 [MW] necesita entre 5 a 6 pozos de producción y 2 a 3 pozos de inyección. [11]

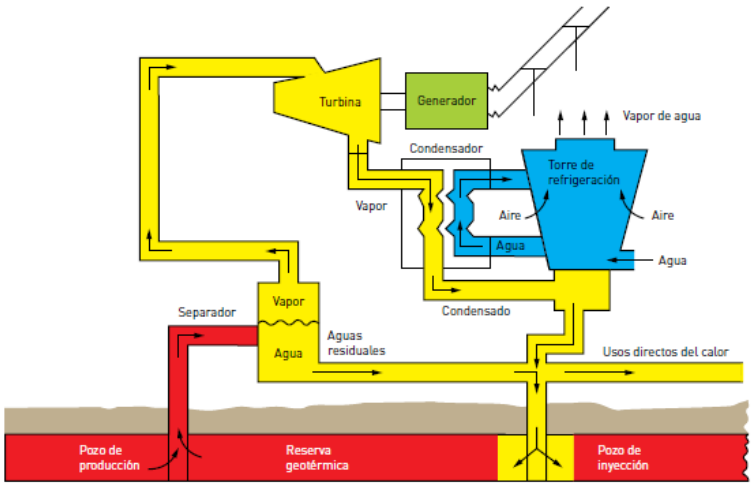


Figura 15. Centrales de flash simple esquema. [9]

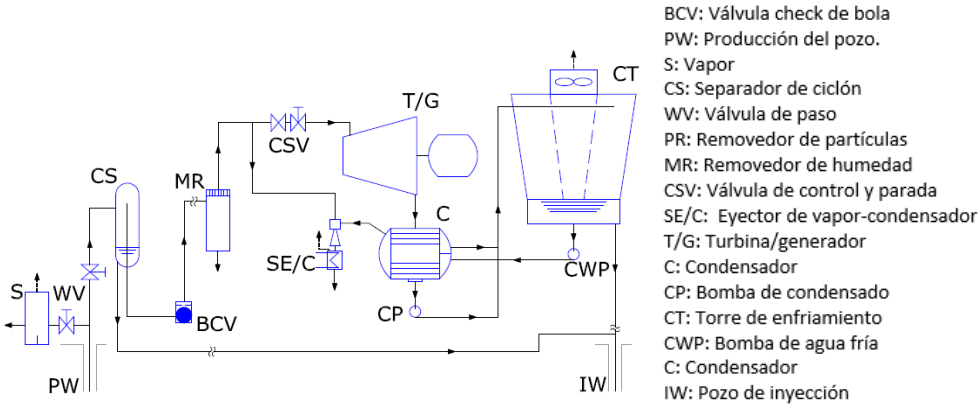


Figura 16. Diagrama de centrales de flash simple. [7]

En la figura 15 y 16; se aprecia el esquema de funcionamiento de las centrales de flas simple, donde el fluido sale de la reserva geotérmica hacia un separador CS, donde se separa el agua residual del vapor, (un paso adicional del que carece las centrales de vapor seco que se dirigen directamente a la turbina) una vez que haya pasado por el separador el vapor se dirige hacia la turbina de vapor T/G, donde el movimiento mecánico se transforma en energía eléctrica por medio de un generador, el vapor expandido en la turbina luego se dirige hacia un condensador C sistema que usa una torre de enfriamiento CT, donde también se combina el vapor condensado y agua enfriada para ser reinyectados al pozo geotérmico.

2.2.4.3 Centrales de flash doble

Las centrales doble flash son una mejora de las centrales simple flash, estas pueden producir entre un 15 y 25 % más de potencia de salida para iguales condiciones del fluido geotermal. Estas centrales eso sí son más complejas, costosas y requieren de un mayor mantenimiento, pero la potencia extra podría justificar su instalación. En mayo de 2007 la cantidad de unidades en funcionamiento era de 69 la que representaban el 14 % de todas las centrales geotermales. La potencia eléctrica de este tipo de centrales varía entre los 4.7 y 110 [MWe] por unidad y el promedio está alrededor de los 32 [MWe] por unidad. [11]

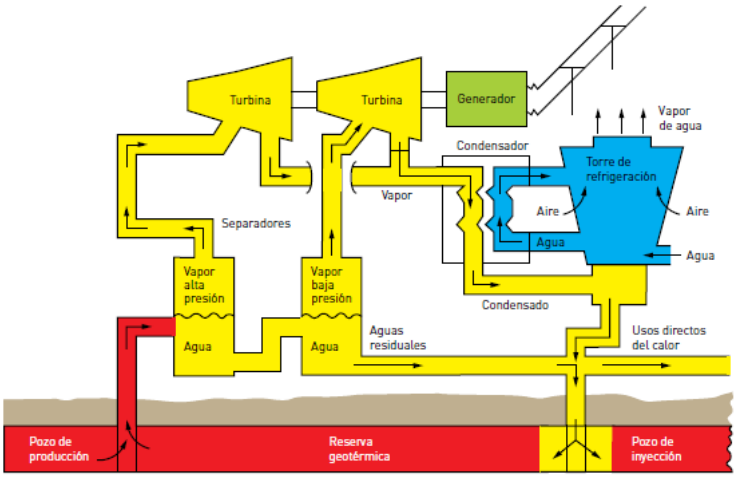


Figura 17. Diagrama de centrales de doble flash. [9]

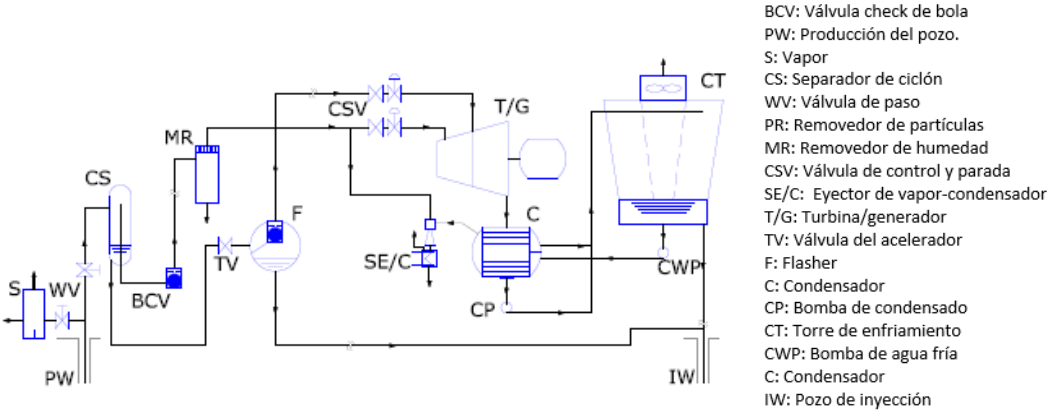


Figura 18. Diagrama de centrales de flash doble. [7]

En las figuras 17 y 18; se muestra el funcionamiento básico de las centrales de doble flash, cuya diferencia con las centrales de simple flash radica en el sistema doble en serie de separadores de agua y vapor, y también el sistema en serie de

dos turbinas, aquí el vapor separado de los residuos de agua es dirigido del primer separador a la primera turbina y del segundo separador a la segunda turbina en serie.

2.2.4.4 Centrales de ciclo binario

Si un fluido geotermal tiene una baja temperatura (180 [oC] o menos) se hace difícil, aunque no imposible, construir una central tipo flash que pueda usar este recurso tanto eficientemente como económicamente. Es por este motivo que se utilizan centrales de ciclo binario las cuales ocupan el fluido geotermal para calentar otro fluido de trabajo que tenga bajo punto de ebullición para expandir en la turbina y generar potencia eléctrica. [10]

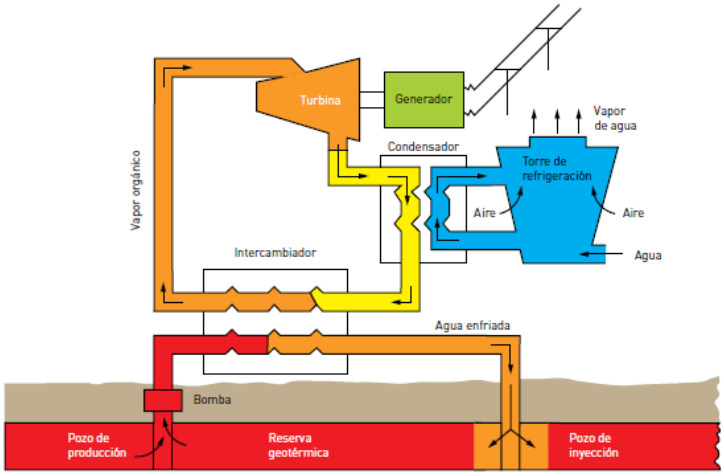


Figura 19. Centrales de ciclo binario esquema. *[9]*

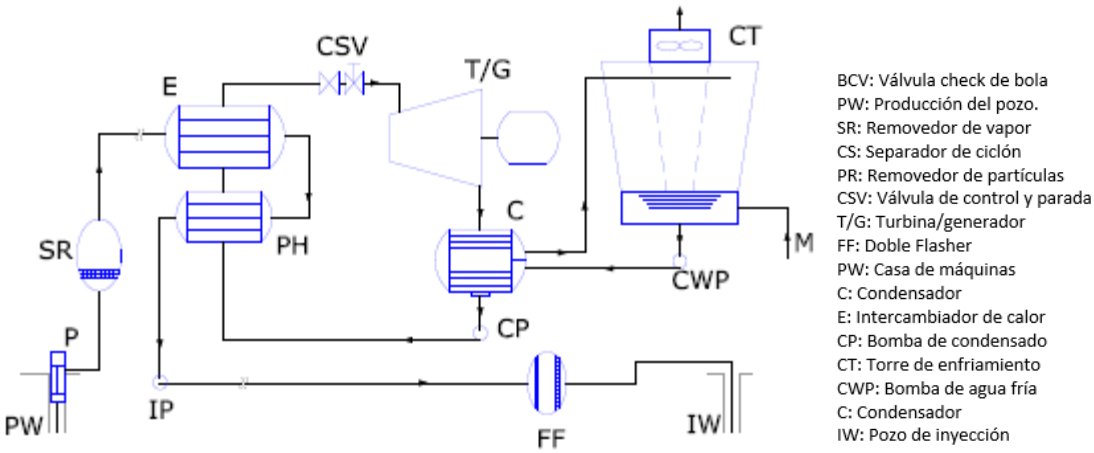


Figura 20. Diagrama de centrales de ciclo binario. [7]

A diferencia de las anteriores centrales de generación eléctrica mediante energía geotérmica, aquí el fluido de trabajo es otro fluido con menor punto de ebullición, como se observa en las figuras 19 y 20, el fluido sale del pozo geotérmico y se dirige hacia un intercambiador de calor, donde el calor del vapor de agua se dirige hacia el fluido de trabajo que se evapora y a partir de aquí tiene un funcionamiento igual al de una central de vapor seco.

Tabla 4. Comparación de tecnologías para la producción de energía eléctrica mediante energía geotérmica. Elaboración propia.

Tecnología **Características**	**Sistemas de conversión directa**	**Sistemas de expansión súbita de una etapa**	**Sistemas de expansión súbita de dos etapas**	**Sistemas de ciclo binario** **(Usa fluido de trabajo diferente al agua)**
Cuando predomina	Vapor seco	Agua líquida	Agua líquida con bajo contenido de impurezas	Agua líquida
Rango de temperaturas **ºC**	180-185	155-165	155-165	100-200
Rango de presiones **MPa**	0,8-0,9	0,5-0,6	0,5-0,6	-------

2.2.5 Tipos de turbinas de vapor usadas

En función de sus condiciones de trabajo, las turbinas de vapor suelen agruparse en los siguientes tipos básicos de turbinas: condensación, contrapresión, extracción y recalentamiento interno. [5]

2.2.5.1 Turbina de condensación

Son las más utilizadas en las centrales geotérmicas, En estas turbinas, la temperatura del condensador suele situarse entre los 60 y 40ºC; lo cual obliga a mantener en el condensador, una presión inferior a la atmosférica, situada entre 0.2 bar y 0.07 bar absolutos. En la figura 21 se puede observar la presentación comercial de una turbina de condensación.

Figura 21. Turbina de condensación.[12]

Se trata de una máquina de una sola carcasa y flujo sencillo, con dos cojinetes. En esta máquina se utilizan válvulas de levantamiento por leva y una caja de toberas de 360°. Esta última por lo general se aplica en las turbinas con presiones de admisión de más de 900psig. (62.0 bar). En esta turbina también se utiliza una construcción de casco doble entre la caja de toberas de admisión y las válvulas de extracción.[13] En la figura 22 se observa una turbina de condensación seccionada Este diseño de casco doble limita la presión y la temperatura del vapor a las que se expone la carcasa exterior, proporciona la mayor flexibilidad en la carcasa de la turbina, requerida por las máquinas que deben tolerar variaciones en el proceso.

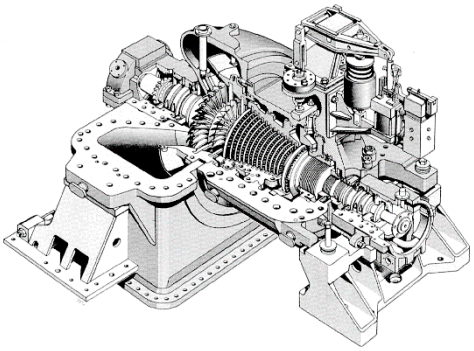


Figura 22. Sección de turbina de condensación.[13]

2.2.5.2 Turbina de contrapresión

Cuando se dispone de vapor de calidad suficiente y el sistema presenta una demanda de vapor de procesos, puede turbinarse el vapor para generar energía eléctrica y descargarlo a una presión suficiente como para atender a la alimentación de los procesos, se las conoce con este nombre porque descargan a una presión superior a la atmosférica. Ver figura 23.

Figura 23. Turbina de contrapresión.[12]

2.2.5.3 Turbina de condensación con extracción intermedia

Estas turbinas descargan un vapor húmedo a un nivel térmico muy bajo, que es poco útil para los procesos de calefacción habituales, pero son capaces de extraer una gran cantidad de energía mecánica del vapor de alimentación, mientras que las de contrapresión sacrifican parte de la conversión de entalpia en energía mecánica, a fin de obtener un vapor de escape a un nivel térmico tal que puede ser usado en procesos de calefacción industrial. Ver figura 24.

Figura 24. Turbina de condensación con extracción intermedia.[12]

2.2.5.4 Turbina con recalentamiento intermedio

Este puede ser formado por un sistema de dos turbinas, una de alta y otra de baja, físicamente diferenciadas, o bien puede conseguirse el mismo efecto mediante una turbina única de dos etapas. La ventaja de esta modificación se basa en que aumenta notablemente el trabajo generado por unidad de masa de vapor turbinado. [10]

2.3 Principios de Dinámica de Sistemas

La Dinámica de Sistemas fue desarrollada originalmente por el profesor Jay W. Forrester en el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT, por sus siglas en inglés) en la década de 1950. Se aplicó la dinámica de sistemas en la industria directamente en la gestión de la cadena productiva y otros sistemas industriales. La idea principal era modelar estructuras de organización que utilizan diagramas de stock y flujo. En los próximos años, Forrester aplicó la dinámica del sistema a la economía, ciencias sociales, y la planificación urbana. El enfoque de la dinámica de sistemas se propagó rápidamente de las aplicaciones industriales originales a muchas otras disciplinas. [14] [15]

Los modelos de simulación basados en la Dinámica de Sistemas se están convirtiendo cada vez más populares en el análisis de políticas energéticas, incluyendo el calentamiento global, la desregulación, la conservación y la eficiencia. La utilidad de estos modelos se basa fundamentalmente en su capacidad para vincular los patrones observables de comportamiento a nivel micro, de un sistema estructural muy complejo. [16]

Un sistema es un conjunto de partes interconectadas para formar una estructura que produce un cierto comportamiento. Un sistema dinámico es un sistema que tiene memoria, lo que significa que los estados anteriores afectan los estados futuros. La dinámica de sistemas es una forma de estudiar la estructura y el comportamiento de los sistemas complejos, y por lo tanto, el objetivo principal es describir la estructura lo más veraz posible y sus causalidades, utilizando lazos de retroalimentación, retardos y la no linealidad. Todo esto crea un modelo complejo y no lineal, que es difícil de entender. Por lo tanto, el comportamiento se estudia en simulaciones a través de un ordenador. [17]

Es importante entender el comportamiento del sistema como un todo, porque las diferentes partes están interactuando indisolublemente entre sí. Esta parte del proceso se suele llamar el pensamiento sistémico, lo que implica determinar causalidades, lazos de retroalimentación y retardos. [17]

Matemáticamente un modelo en Dinámica de Sistemas es un sistema de ecuaciones diferenciales de tipo:

$$\frac{dN_i(t)}{dt} = FE_i(t) - FS_i(t) \qquad i = 1 \ldots\ldots n \tag{1}$$

$$\text{ó} \quad N_i(t) = N_i(0) + \int_0^t [FE_i(t) - FS_i(t)]dt \tag{2}$$

Donde N, representa el valor de una variable en un momento dado, que se modificada en el tiempo por el flujo de entrada (FE) y el flujo de salida (FS). Posteriormente algunos programas resuelven las ecuaciones por métodos numéricos, como el método de Euler.[18]

2.3.1 Diagrama causal

Las flechas en un bucle de realimentación de refuerzo (positivo) y uno de realimentación de equilibrio (negativo), ilustran la dirección de la causa y la información. Los signos más y menos ilustran la polaridad del efecto. Un signo más significa que si A aumenta entonces B aumenta (si A disminuye luego disminuye B). El signo menos significa que si F aumenta entonces D disminuye (si F disminuye luego D aumenta). En resumen, en diagramas de circuitos causales (+) los signos denotan el cambio en la misma dirección y (-) cambio de signo en la dirección opuesta.[17]

Diferentes modeladores utilizan diferentes símbolos en los modelos. Un bucle de refuerzo puede estar indicada con la letra R signo (+) y un bucle de regulación con la letra B signo (-), ver figura 25. [17]

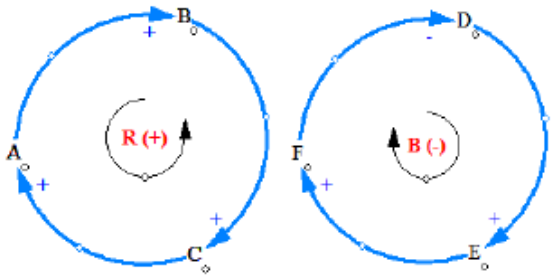


Figura 25. Bucle de realimentación positiva y negativa.[17]

2.3.2 Diagramas de niveles y flujos

Llamados también diagramas de Influencia o Diagramas de Forrester, tienen origen con la creación de la Dinámica de Sistemas, se presentan como diagramas de “Stock and Flows” [19]. Su representación tiene relación cercana a la del modelo matemático.

Existen ciertas reglas básicas o principios para la construcción de diagramas de niveles y flujos (ver figura 26).

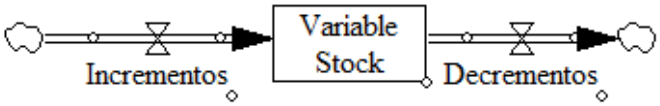


Figura 26. Diagrama de niveles y flujos. Elaboración propia

2.3.3 Evaluación del modelo

Para los criterios de evaluación, validación y análisis del modelo se ha tomado del trabajo planteado por el autor Nelson Jara. [17]

El modelo debe ser evaluado en consideración a su capacidad de reproducir el comportamiento del sistema. Esto permite observar cómo políticas de manejo, tienen efectos en la estabilidad de los niveles del sistema, además de este aspecto, el modelo debe ser evaluado en relación con su respuesta a las metas propuestas.

Los modelos deben recoger las tendencias de comportamiento del sistema. Ellos deberán reflejar los estados de crecimiento o decrecimiento cuando la organización se comporte de igual manera; asimismo, deben ser capaces de reproducir las estacionalidades de los sistemas.

2.3.4 Validación del modelo

Cuando el modelo se basó en datos inexistentes (dados por intuición o experiencia), se puede recurrir a información de sistemas similares y será posible incluir apreciaciones subjetivas. Pero se debe tener claro las limitaciones de su alcance y debe planearse su revisión en la medida que se reúna datos nuevos.

Cuando la información es apropiada, inicialmente se puede proceder como si se careciera de ella para evaluar posibles problemas en la frontera del sistema y posteriormente se podrán utilizan métodos estadísticos, empezando por diferencias absolutas y porcentuales, pasando por pruebas de tendencia (correlacionalidad) y concluyendo con los de bondad de ajuste.

En la planificación a largo plazo y en la evaluación de políticas o estrategias organizacionales no se prevé como fin construir escenarios exactos, sino, buscar acciones que permitan el logro de ciertas metas globales.

2.3.5 Análisis del modelo

Para efectuar análisis de sensibilidad del modelo se determina cuáles son los parámetros que inducen variaciones apreciables en los resultados. Esto implica realizar estimaciones cuidadosas de dichos parámetros y una atención cuidadosa en la construcción de hipótesis de los escenarios propuestos.

La forma de procedimiento para la selección e identificación de parámetros sensibles presupone un conocimiento detallado del sistema, por cuanto su examen exhaustivo puede ser impracticable en modelos de gran envergadura.

Capítulo 3. Planteamiento del modelo

En este capítulo se realiza el planteamiento del modelo de Dinámica de Sistemas en donde se usa el herramienta Vensim para su respectiva simulación; se referencia también los datos tomados para realizar el modelo, en este caso el modelo es realizado tomando en cuenta aspectos de índole tecnológica, política y ambiental, para obtener los resultados más cercanos a la realidad; al final del capítulo con el modelo creado y simulado, se procederá a plantear los escenarios mínimos necesarios para la toma de decisiones. También se realizará una valoración económica del proyecto a través de criterios económicos como el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR)

3.1 Variables de modelo

En esta sección se realiza un estudio de los datos tanto de partida como de proyección de nuestras variables como lo son: tecnológicas, ambientales y económicas, las mismas que son el enfoque de nuestra investigación.

3.1.1 Horizonte temporal del modelo

El presente modelo es realizado ha sido delimitado entre los años 2016 a 2046, cumpliendo un periodo de 30 años, debido que es el tiempo de vida útil para plantas de generación eléctrica mediante energía geotérmica, en estos están incluidos los 5 primeros años de implementación de la misma. Cabe mencionar que no se realiza un análisis con datos posteriores a estas fechas debido a que no existen datos históricos de generación eléctrica mediante energía geotérmica en el Ecuador.

3.1.2 Determinación de las Variables tecnológicas del modelo

Dentro de las variables tecnológicas se ha priorizado el cálculo del potencial bruto del yacimiento para posteriores cálculos económicos, para esto se ha decidido calcular dicho potencial mediante el modelo volumétrico.

El modelo volumétrico calcula la energía asociada intrínsecamente al contenido en masa en un yacimiento, considera que el yacimiento entregará toda la materia que tiene contenida y esta se usará con un porcentaje de evaporación en el separador y un factor de transformación típico. Es una de las formas más sencillas de tener una primera aproximación del potencial geotérmico que se puede encontrar en un yacimiento, éste tipo de análisis se utiliza cuando se carece de información específica del yacimiento, por lo que es necesario realizar varias suposiciones.[8]

Dentro del modelo volumétrico es necesario calcular el gasto másico para obtener el potencial del yacimiento. Entonces se calcula el gasto másico necesario para agotar el volumen de agua en el periodo del proyecto con una tasa de extracción constante.[8]

$$\dot{m}_v = \dot{m}_a X_{sep} \tag{3}$$

$$\dot{m}_v = \frac{\phi V_t \rho_a}{t} X_{sep} \tag{4}$$

Donde:

- $\dot{m}_v$ es el gasto de vapor o gasto másico
- $\dot{m}_a$ es el flujo másico
- ϕ es la porosidad de la roca del yacimiento
- V_t es el volumen total, que es igual al área por el espesor del yacimiento
- ρ_a es la densidad del agua
- t es el tiempo de vida útil del yacimiento
- X_{sep} es la calidad del vapor en el separador

Se estima la potencia una vez que se haya calculado el gasto másico dividiendo para el consumo específico CE de vapor en la central.

$$\dot{W}_e = \frac{\dot{m}_v}{CE} \tag{5}$$

Para realizar los cálculos necesarios se deben poseer los valores de las variables, en este caso hemos tomado valores referenciales de un yacimiento geotérmico de Montecarlo en México, en la tabla 5 se observan los datos tomados.

Tabla 5. Datos necesarios para el cálculo de flujo másico, gasto másico, y potencial bruto del yacimiento.[8]

Variable	Nomenclatura	Valor	Unidades
Flujo másico ma			
Porosidad de la roca	ϕ	6	%
Capacidad de yacimiento	V_t	9,69	Km3
Densidad del agua	ρ_a	1000	$kg/m3$
Tiempo de vida de yacimiento	t	30	años
Gasto másico mv			
Calidad en el separador	X_{sep}	14	%
Potencial bruto del yacimiento			
Consumo específico	CE	7	Ton/Mwh

3.1.3 Determinación de las Variables económicas del modelo

Se representa los gastos y costos que tendría una plata de generación eléctrica mediante el uso de energía geotérmica para su implementación, los mismos costos que están determinados a través de sus respectivas fórmulas que se detallan a continuación.

3.1.3.1 Costo de inversión

Considerando la aplicación de economía de escalas, se puede disminuir significativamente el costo específico de algunos componentes. Sanyal (2005) estima que los costos de inversión de proyectos geotérmicos con rangos de capacidad de entre 5-150 MW declinan exponencialmente con su capacidad, de acuerdo con la siguiente relación:[20]

$$\mathrm{CC} = 2500\mathrm{e}^{-0.0025(\mathrm{P}-5)} \tag{6}$$

3.1.3.2 Costo de Operación y mantenimiento

Con el fin de calcular los costos de operación y mantenimiento de la planta, SANDAL (2004), presentó un modelo para capacidades entre 5 y 150 MW, obteniendo la relación siguiente:[20]

$$\mathrm{Costo\ O\&M} = 2\mathrm{e}^{-0.0025(\mathrm{P}-5)} \tag{7}$$

Por otra parte, Sanyal (2004) estima que las actividades de mantenimiento de los pozos de producción debe llevarse a cabo durante al menos diez años para mantener la planta a su máxima capacidad, argumentando que la relevancia económica de llevar a cabo esta actividad después de ese período depende del potencial del recurso, la vida útil prevista del proyecto y las condiciones de venta de la energía.[20]

3.1.3.3 Costo de Financiamiento

Un costo de financiamiento es el costo total de un préstamo en dólares y centavos. Incluye los intereses, los cargos por servicio y por transacción y otros cargos que se cobran sobre el préstamo.[21]

$$Costo\ de\ financiamiento = Costo\ de\ inversion * Tasa\ de\ financiamiento \tag{8}$$

3.1.3.4 Tasa de Financiamiento

Es aquella tasa de interés de un crédito que incluye el interés bancario-financiero más las comisiones adicionales, así como los impuestos que gravan a la operación en sí. [22]

$$\text{Tasa de financiamiento} = 8\%$$

3.1.3.5 Costo de planta

Este costo no es más que la sumatoria de los costos anteriores, es decir el costo de inversión, costo de operación y mantenimiento, y el costo de financiamiento. Queda expresado mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Costo de planta} = \text{Costo de inversion} + \text{Costo de O\&M} + \text{Costo de Financ.} \qquad (9)$$

3.1.3.6 Eficiencia mejorada

Sistemas geotérmicos mejorados (EGS) están diseñados embalses creados para producir energía a partir de recursos geotérmicos que de otra manera no son económicos debido a la falta de agua y / o permeabilidad. EGS tecnología tiene el potencial para tener acceso a vastos recursos de la tierra de calor situado en la profundidad para ayudar a satisfacer las necesidades energéticas de los Estados Unidos. [23]

La mayoría de las plantas de energía geotérmica pueden funcionar a la disponibilidad mayor que 90% (es decir, la producción de más de 90% del tiempo). [23]

$$\text{Eficiencia mejorada} = 10\%$$

3.1.3.7 Ahorros en costo

Son los ahorros que se tendría si se logra implementar sistemas de eficiencia mejorados con tecnologías que en la actualidad se encuentran en fase de pruebas principalmente en plantas de EEUU, donde actualmente se trabaja en sistemas Geotérmicos Mejorados (EGS), por sus siglas en ingles.

$$\text{Ahorros en el costo} = \text{eficiencia mejorada} * \text{costo de planta} \qquad (10)$$

3.1.3.8 Transmisión Central-Subestación

Es el costo de las instalaciones de transmisión de la energía eléctrica desde la central de generación geotérmica hasta la subestación más cercana, el cual, está determinado mediante un factor en función de la distancia que es de aproximadamente 725,000 USD por cada kilómetro [24], expresada por la siguiente ecuación:

$$Transmisión\ Central - Subestacion = 725000USD * DistanciaKM \quad (11)$$

3.1.4 Determinación de las Variables ambientales del modelo

3.1.4.1 Costos de bonos o certificados de carbono

Los bonos de carbono son un componente clave de los esfuerzos nacionales e internacionales para mitigar el incremento de las concentraciones de gases del efecto invernadero (GEI). Las políticas de reducción de emisiones de gas carbono iniciaron con el protocolo de Kioto el cuál entro en vigor 16 de febrero de 2005. A este protocolo entraron varios países industrializados y la Unión Europea quienes se comprometieron a estabilizar las emisiones de gases de efecto invernadero como el CO2.

Se fijan límites máximos para las emisiones de gases de efecto invernadero y entonces se utilizan los mercados para asignar las emisiones de entre el grupo de las fuentes reguladas.[25] El sistema ofrece incentivos económicos para que empresas privadas contribuyan a la mejora del sistema operativo de la calidad ambiental y se consiga regular la emisión generada por sus procesos productivos, considerando el derecho a emitir CO2 como un bien canjeable y con un precio establecido en el mercado. El protocolo de Kioto fue ratificado en su siguiente etapa, con la novedad de que países como Rusia, Estados Unidos, y Canadá decidieron no participar dentro de esta prórroga del protocolo, lo cual hizo decaer el valor de los bonos de carbono.

En la figura 27; se observan los costos anuales de los certificados de carbono.

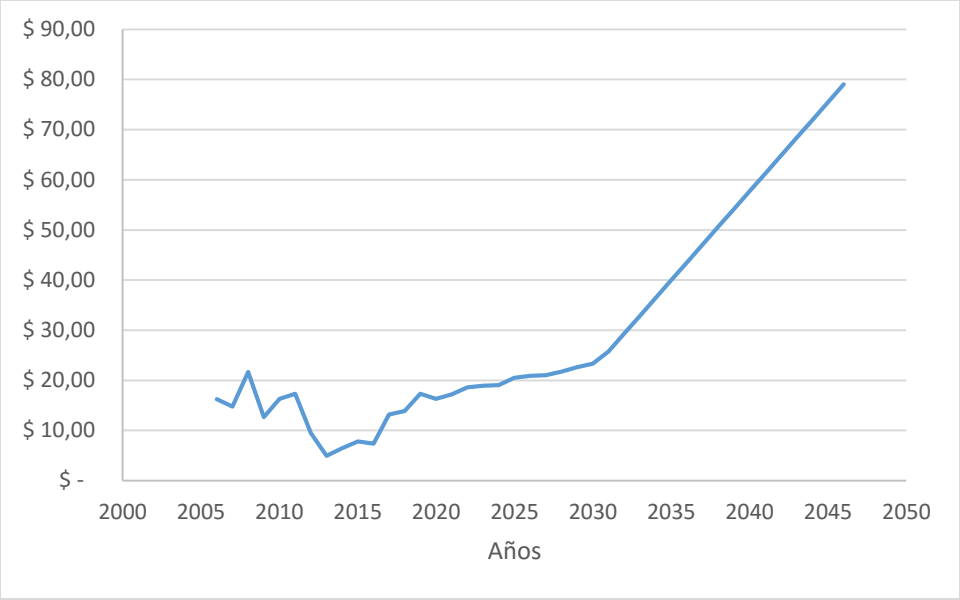


Figura 27 Costos de los certificados de carbono en el tiempo.[26]

3.1.4.2 Costo de emisiones evitadas de CO2

Por la generación de energía eléctrica mediante el uso de energías renovables existente una cantidad considerable de toneladas de CO2 evitadas, lo cual tiene un beneficio para el medio ambiente y el país, económicamente hablando. Para el cálculo del costo de emisiones evitadas de CO2 se utilizará la siguiente fórmula.

$$\text{Costo de emsiones evitadas de CO2} = \text{Costo Certificados CO2} * \text{Ton CO2} \qquad (12)$$

3.1.4.3 Factor de emisión generado no renovable (F. E. N. R)

La electricidad se genera en parte por la combustión de recursos no renovables, como los combustibles fósiles (carbón, diesel, bunker, gasolina, gas natural, gas licuado de petróleo, otros); que se utilizan típicamente en calderos, turbinas o motores de combustión interna. Estos dispositivos a su vez accionan un generador eléctrico. Los rendimientos energéticos (electricidad producida/calor liberado de combustión) con tecnologías convencionales son normalmente bajos, varían entre 0.3 y 0.35. Las tecnologías de cogeneración (generación de electricidad y aprovechamiento del calor de los gases de combustión) o de ciclo combinado (generación de electricidad y aprovechamiento del calor de los gases de combustión para generar una cantidad adicional de electricidad) permiten obtener rendimientos mayores, entre 0.4 y 0.55. El uso de combustibles fósiles

para la generación de electricidad, implica la emisión de contaminantes del aire y de gases de efecto invernadero.[27]

$$\text{Factor de emision generado no renovable} = 0.374\ \text{TonCO2/MWh} \qquad (13)$$

3.1.4.4 Factor de emisión generado geotérmico (F. E. G. G)

La explotación de la energía geotérmica también tiene efectos en el ambiente, aunque es menos contaminante que la mayoría de fuentes convencionales de energía.[28]

El principal contaminante descargado es el bióxido de carbono (CO 2), que en una planta geotérmica está en un rango 13 a 380 g/kWh, mientras que una planta de carbón emite 1042 g/kWh, 906 g/kWh una de hidrocarburo y 453 g/kWh una de gas natural. [28]

$$\text{Factor de emision generado geotérmico} = 0.05\ \text{TonCO2/MWh} \qquad (14)$$

3.1.4.5 Cantidad de Generación Eléctrica

En esta variable se toma los datos de generación eléctrica del Ecuador desde el año 2006 y se hace una proyección de generación hasta el año 2030.

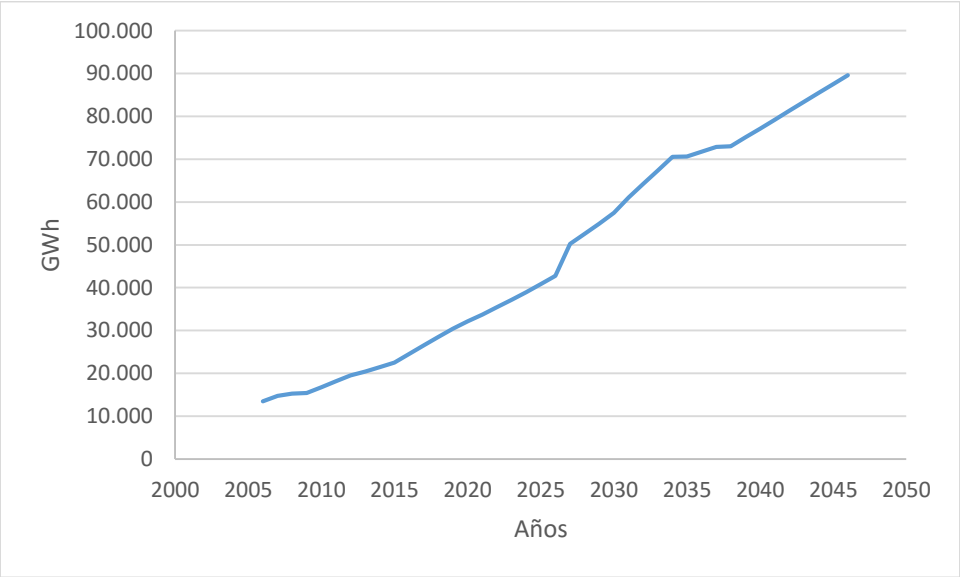


Figura 28 Evolución y previsión del consumo total de energía en el Ecuador[2]

3.1.4.6 Ton de CO2 por generación de No Renovable

Esta variable se establece un valor en función del factor de emisión generado no renovable y la cantidad de generación eléctrica en el Ecuador. Mismo que queda establecido en la ecuación mostrada a continuación.

$$\text{Ton CO2 generado No Renovable} = \text{F. E. N. R} * \text{Cantidad de generación} \quad (15)$$

3.1.4.7 Ton de CO2 por Generación Geotérmica

Esta variable se establece un valor en función del Factor de Emisión Generado Geotérmico y la cantidad de generación eléctrica en el Ecuador. Mismo que queda establecido en la ecuación mostrada a continuación.

$$\text{Ton CO2 generado geotérmico} = \text{F. E. G. G.} * \text{Cantidad de generación} \quad (16)$$

3.2 Diagramas causales

Se plantea cada relación causal que se lleva en función de las variables antes mencionadas para el modelo, en esta sección también indicaremos como fue influenciada cada una de ellas es decir si tiene una alimentación o retroalimentación positiva y negativa.

3.2.1 Diagrama causal del modelo general

La figura 29; muestra el diagrama causal general, el cual abarca los tres diagramas anteriores: ambiental, económico y tecnológico. Este diagrama indicara la relación de estas tres variables que tendrán con el Costo Total de Inversión del Proyecto Geotérmico. Así las variables tecnológicas influyen directamente en forma positiva a las variables económicas y las ambientales; las variables económicas afectan de manera positiva al costo total de la inversión del proyecto geotérmico o sea que incrementa su costo, y las variables ambientales decrementan el costo del proyecto.

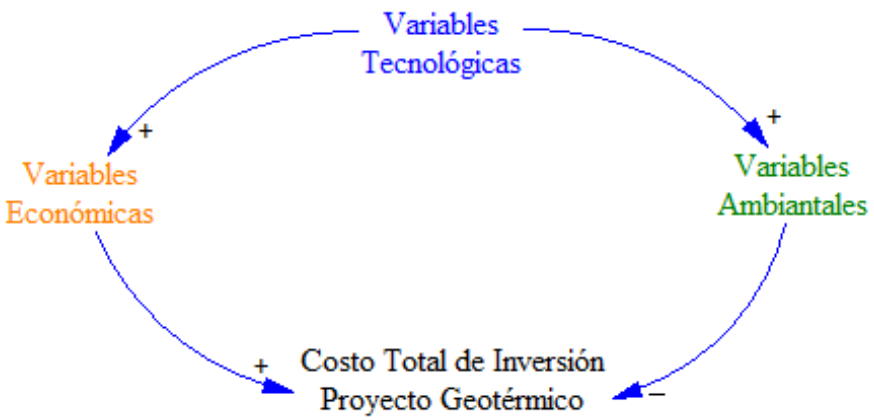


Figura 29. Diagrama causal del Modelo General

3.2.2 Diagrama causal de la variable tecnológica.

Este diagrama se compone de varios factores que alimentan e influyen directamente sobre el potencial de yacimiento que es la parte principal de esta sección, los mismos que son los siguientes: gasto másico, flujo másico, consumo específico y potencial bruto de yacimiento. La distribución y el sentido de alimentación se expresan en la figura 30.

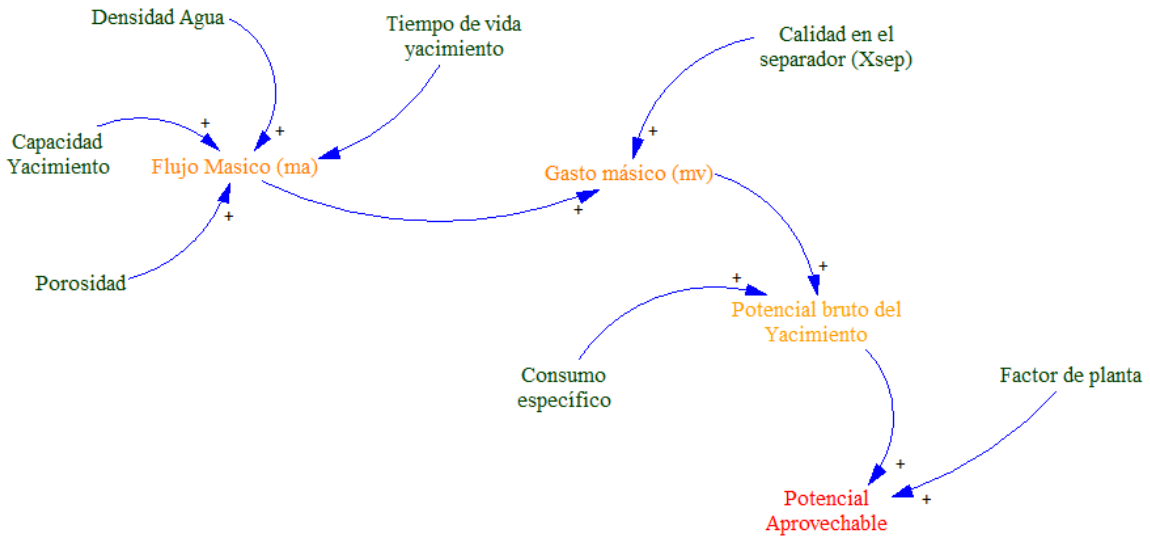


Figura 30. Diagrama causal que determina el Potencial Aprovechable del Yacimiento Geotérmico.

3.2.3 Diagrama causal de la variable Económica

Para el diagrama causal del factor económico se hizo la siguiente relación que se muestra en la figura 31; donde podemos apreciar que el costo de inversión y el costo de operación y mantenimiento están ligadas directamente con el potencial aprovechable del yacimiento.

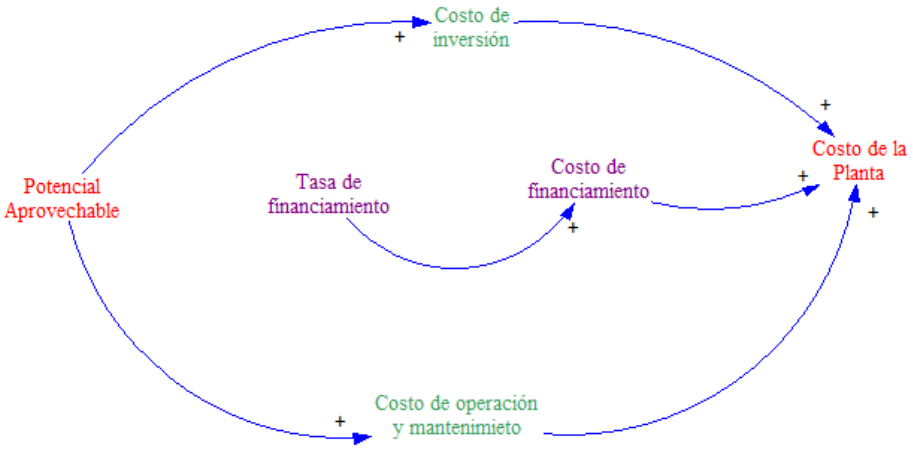


Figura 31. Diagrama causal que determina el costo de la planta.

3.2.4 Diagrama causal de la variable ambiental

En la figura 32; se muestra todos los factores que intervienen en para determinar el costo de emisiones evitadas de CO2, así mismo se puede observar cómo queda la alimentación tanto positiva como negativa para la cantidad de toneladas de CO2 que se evitarían.

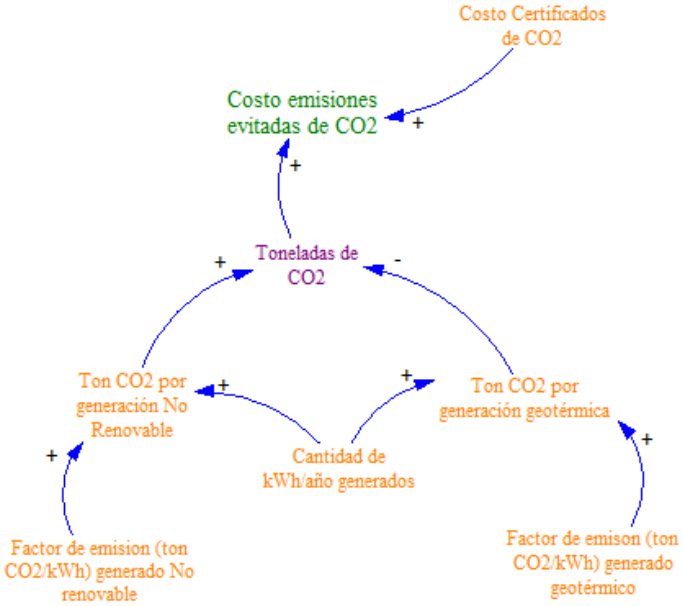


Figura 32. Diagrama causal que determina el costo de emisiones evitadas de CO2

3.3 Criterios económicos para el modelo

Se hace una consideración de los siguientes criterios económicos para evaluar principalmente la inversión del proyecto geotérmico de generación eléctrica, utilizando herramientas financiaras como lo son el Valor Actual Neto VAN y la Tasa Interna de Retorno TIR.

3.3.1 Criterio de Valor Actual Neto (VAN)

El valor actual neto plantea que el proyecto debe aceptarse si su valor actual neto (del proyecto) es igual o superior a cero, donde el VAN es la diferencia entre todos sus ingresos y egresos expresados en moneda actual. El VAN como criterio representa una medida de valor o riqueza, es decir, al calcular el VAN se busca determinar cuánto valor o desvalor generaría un proyecto para una compañía o inversionista en el caso de ser aceptado. [29]

El cálculo del VAN varía en función de la tasa de costo de capital utilizada para el descuento de flujos, puede expresarse la fórmula matemática de este criterio de la siguiente manera:

$$VAN = \sum_{t=1}^{n} \frac{BN_t}{(1+i)^t} - I_0 \qquad (17)$$

3.3.2 Criterio de la Tasa Interna de Retorno (TIR)

Este criterio evalúa el proyecto en función de una única tasa de rendimiento por periodo, con la cual la totalidad de los beneficios actualizados son exactamente iguales a los desembolsos expresados en moneda actual. [29]

La tasa interna de retorno puede calcularse aplicando la siguiente ecuación:

$$\sum_{t=1}^{n} \frac{BN_t}{(1+i)^t} - I_0 = 0 \qquad (18)$$

Comparando esta ecuación con la anterior, puede apreciarse que este criterio es equivalente a hacer el VAN igual a cero y determinar la tasa que le permite al flujo ser igual a cero.

La tasa así calcula se compara con el costo de capital utilizado por la empresa o inversionista para el descuento de los flujos proyectados. Si la TIR es igual o mayor que esta, el proyecto debe aceptarse; si es menor, debe rechazarse.[29]

3.4 Resultados de la simulación del estado actual

Se establece como situación actual, la simulación del modelo con los parámetros establecidos en la actualidad, es decir, datos técnicos y valores económicos que nos permita conocer cómo se comparta el modelo este tiempo, sin variar a condiciones optimistas o pesimistas que serán analizadas en el siguiente capítulo.

Modelos inicia en el año base de 2016 ya que en la actualidad no existen datos históricos de generación de energía geotérmica, y se hace una proyección de 30 años, que es el tiempo en el cual una planta de generación eléctrica mediante energía geotérmica tiene de vida útil, por tanto, la simulación del modelo finalizara en el año 2046.

En la figura 33; se observará el costo total de inversión del proyecto geotérmico con los datos de simulación actual, del cual podemos ver un costo de inversión de 120 millones de USD aproximadamente. Los primeros cinco años son los gastos más elevados debido que en este lapso de tiempo se hace la inversión y lo demás son los gastos por operación y mantenimiento principalmente.

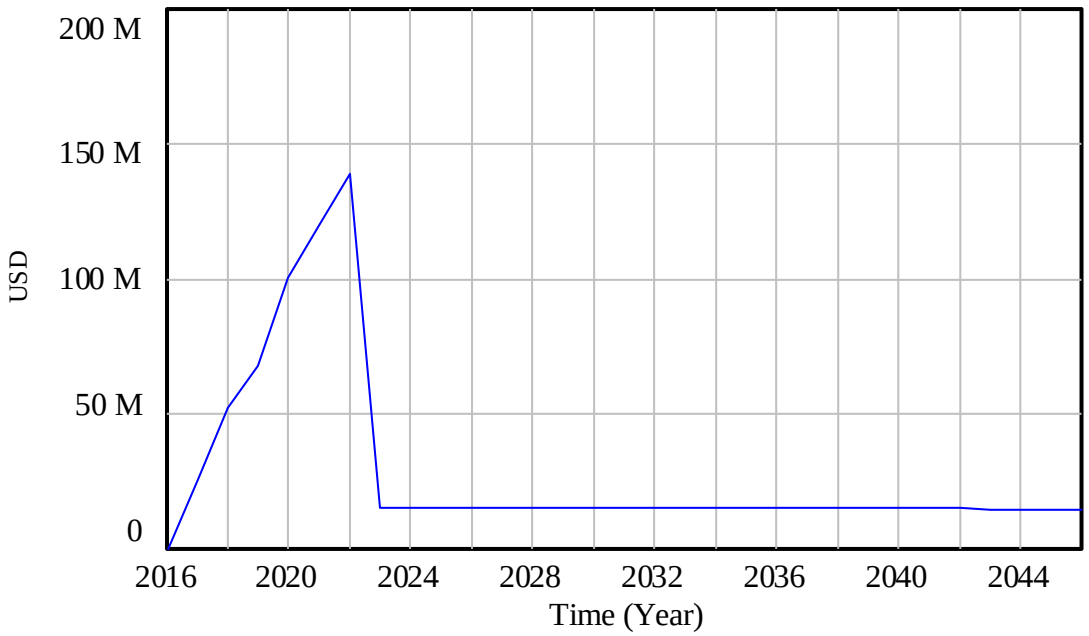


Figura 33. Costo total de inversión del proyecto geotérmico, situación actual.

En la gráfica 34 de costo de inversión se puede observar que es creciente hasta el año 2021, de ahí en adelante es cero, debido a que la inversión solo se considera durante los primeros 5 años de implementación que tienen las plantas geotérmicas.

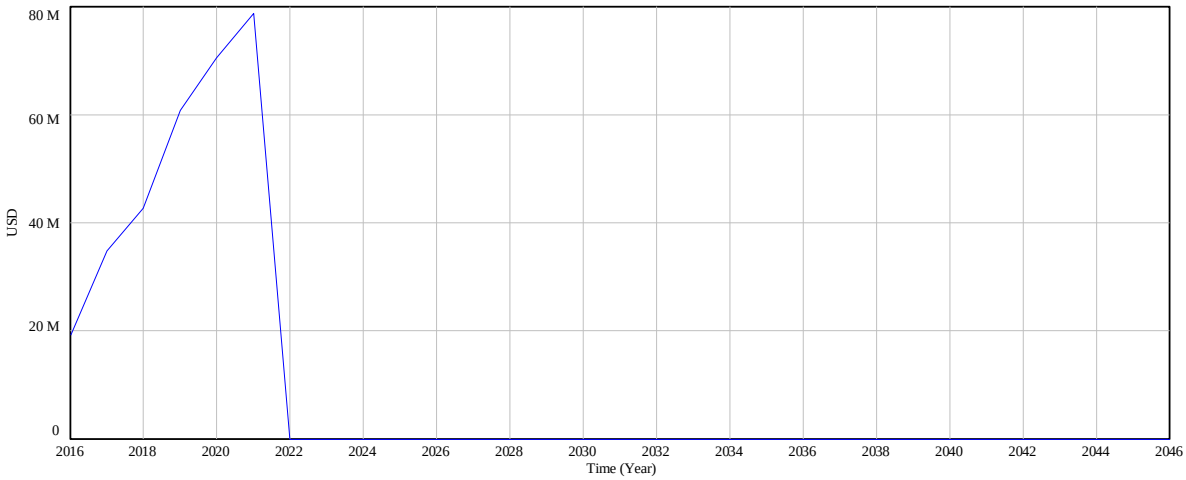


Figura 34. Costo de Inversión de la Planta de Generación Geotérmica.

El costo de operación y mantenimiento que se muestran en la figura 35; son crecientes ya que año a año estos incrementaran debido al uso que se la dará a la planta, puesto que estas pueden trabajar a factores de planta superiores al 85%, y el modelo inicia con un factor del 72%

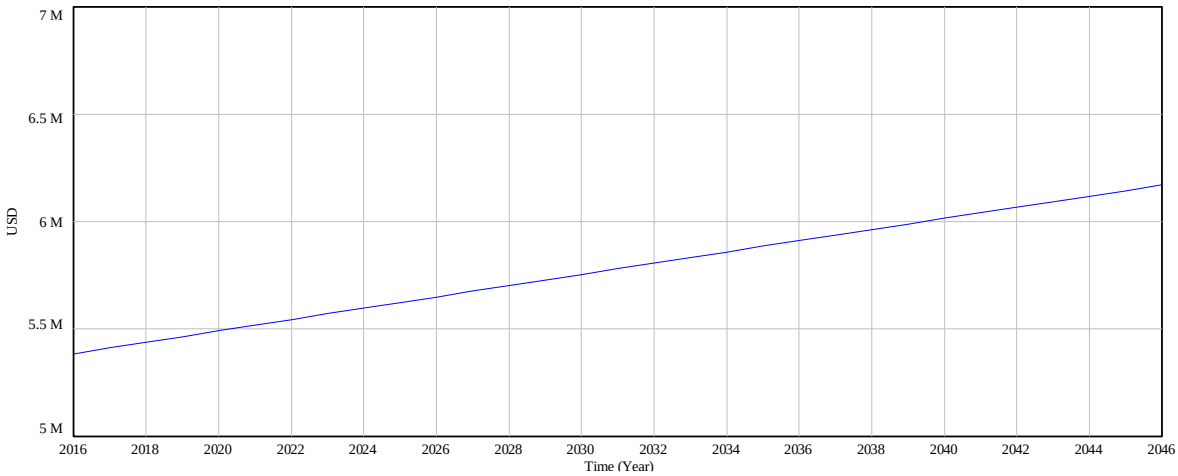


Figura 35. Costo de Operación y Mantenimiento de la Planta de Generación Geotérmica.

Otro factor importante a considerar es el costo de transmisión de la energía eléctrica desde la planta de generación hasta la subestación más cercana, en la cual se considera durante los primeros cinco años de implementación, es decir, es decir es un valor que solo se lo realizara una vez. (Ver figura 36)

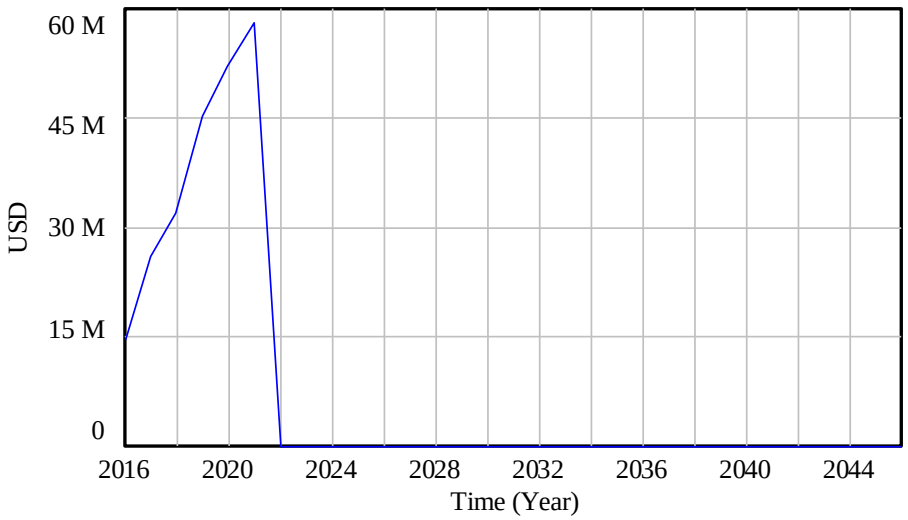


Figura 36. Costo de Transmisión Central de Generación a la subestación eléctrica

Capítulo 4. Resultados

En este capítulo se analizará los resultados de la simulación, implementando variaciones en factores que vuelven al sistema mucho más sensible, estos quedan planteados mediante escenarios optimista, pesimista, y el escenario actual. Con esto cumplimos con el objetivó especifico planteado: "Analizar escenarios y plantear propuestas de implementación de plantas de generación de energía eléctrica mediante fuentes geotérmicas."

4.1 Planteamiento de Escenarios

La posibilidad de introducir variaciones en el modelo hace que nuestro modelo se vuelva dinámico, permitiendo plantear alternativas optimistas y pesimistas obteniendo resultados donde se podría tomar una decisión para la implementación de proyectos de generación eléctrica mediante el uso de energía geotérmica. Para lo cual centraremos la atención en dos aspectos relevantes para la inversión: económico y ambiental.

4.1.1 Escenario optimista

Este escenario presentara un caso en el que las condiciones sean los más favorables posibles, principalmente si se obtiene una tasa de financiamiento mucho más baja comparada con el estado actual, donde por ejemplo el Banco Interamericano de Desarrollo hace préstamos para proyectos en energías renovables con una tasa de un 5%, y proyectando en un futuro un costo de 50 USD de los Certificados de Emisiones Reducidas CER, según las estimaciones que hace la Agencia

Internacional de las Energías Renovables (IRENA, por sus siglas en ingles).[22], [25]

4.1.2 Escenario pesimista

Para el caso particular de este escenario, se considera una tasa de financiamiento elevada en comparación con los escenarios actual y optimista, pero que aún sea rentable para el proyecto establecido en un valor del 12%, según Organizaciones No Gubernamentales ONG que financian también este tipo de proyectos en energías renovables y unos costos de certificados de carbono que sean relativamente bajos o se mantengan al costo actual que es un costo muy bajo de alrededor de los 2 USD.[30]

4.2 Resultados de la simulación de los escenarios

Los resultados presentados a continuación se muestra el escenario optimista (escenarioO), pesimista (escenarioP), así como la situación actual (current). En la figura 37 se puede apreciar el costo total de inversión de proyecto geotérmico, donde los tres escenarios presentan unos costos elevados para los primeros cinco años de implementación de estas plantas de generación siendo su máximo valor en el escenario pesimista un valor de 146 millones USD, y para un escenario optimista de 126 millones USD.

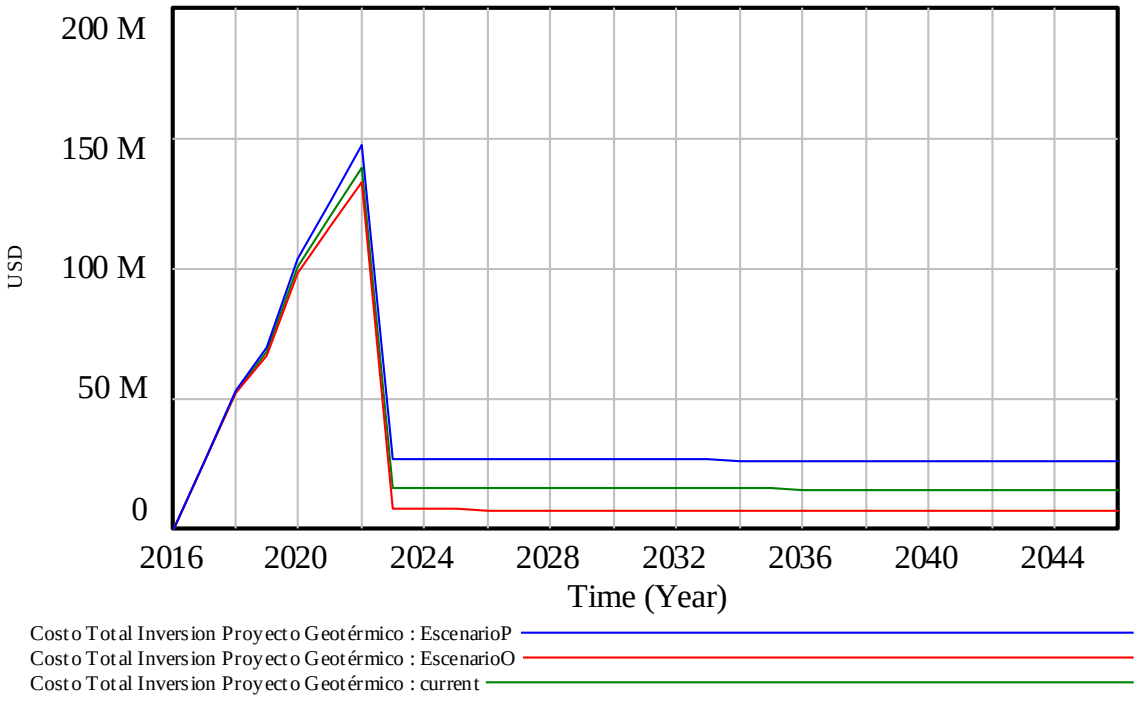


Figura 37. Cotos total inversión proyecto Geotérmico.

La figura 38 muestra únicamente el costo de la planta de generación eléctrica, sin considerar costos de transmisión de la electricidad desde esta hacia la subestación más cercana. Los costos en el caso optimista son de 95 millones de USD y para el escenario pesimista es de 112 millones USD aproximadamente.

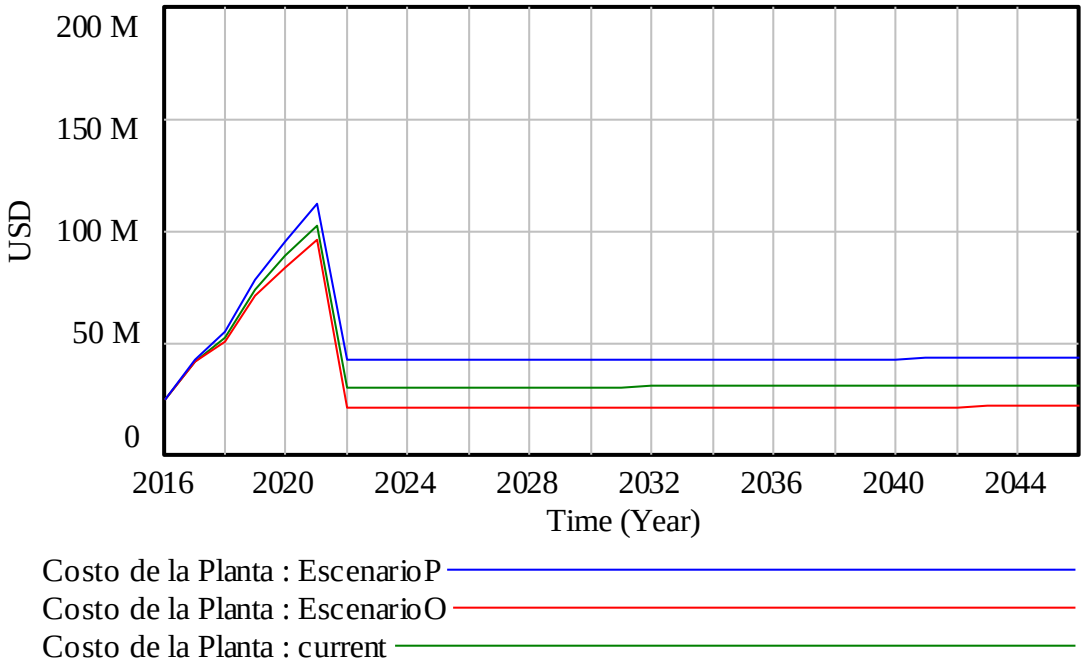


Figura 38. Costo de la Planta del Proyecto Geotermico.

Analizando la gráfica de la figura 39; tenemos por la parte del estado actual un pago por los créditos de carbono muy bajo, cosa que se está viviendo por el momento en el mundo, debido a que, en los tratados internacionales o conferencias mundiales para la disminución de emisiones de carbono, no han participado o se han disociado de la meta países industrializados lo cual afecta directamente al precio de los certificados de carbono. Por otro lado, en el escenario pesimista y en el escenario optimista se observa un aumento en la curva del precio de los certificados, esto se debe a que se ha planteado que en un futuro todos los países (incluidos los países más industrializados) se unan a participar en el mercado de certificados de carbono y a la disminución de emisiones de CO2, lo cual generará un mejor incentivo en el mercado de los certificados teniendo estos un precio más alto por tonelada de emisiones de CO2 evitadas.

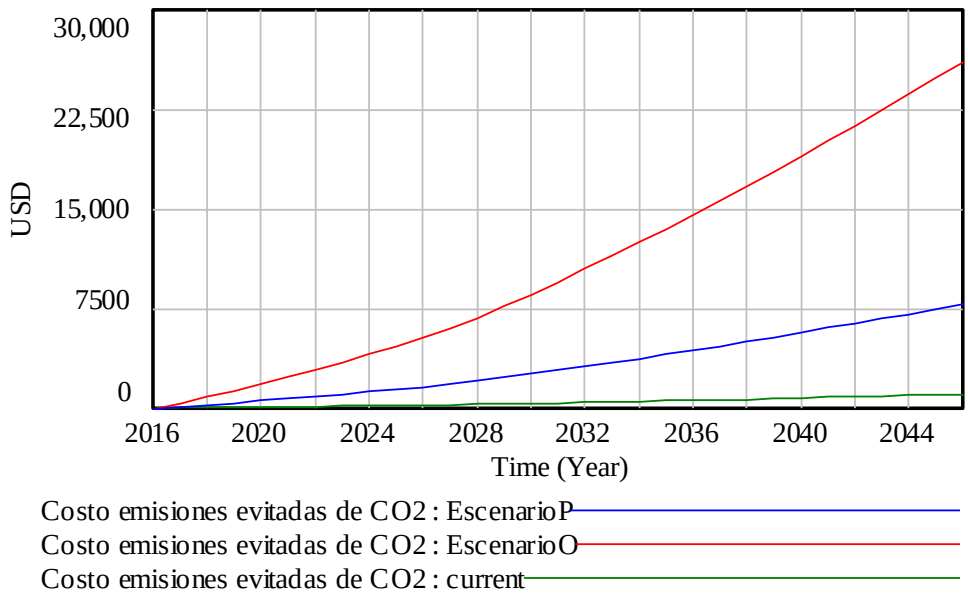


Figura 39. Costo de emisiones evitadas de CO2.

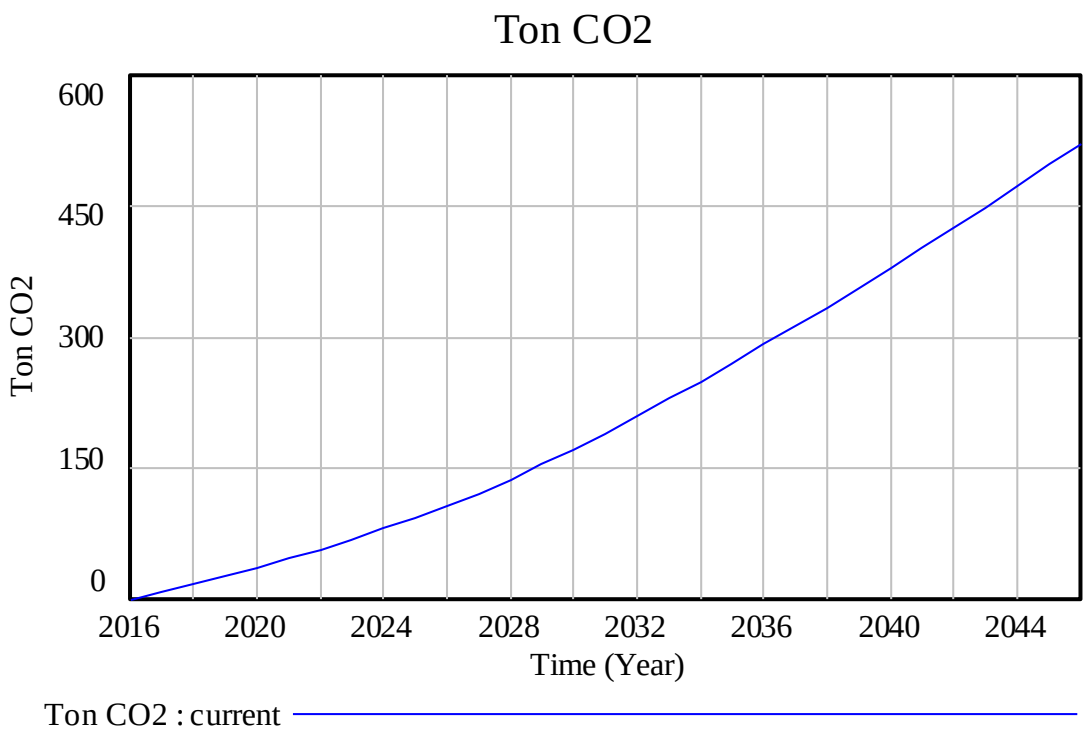


Figura 40 Emisiones evitadas de CO2 al ambiente.

4.3 Análisis de resultados obtenidos de la simulación de los escenarios

Para el estado actual desarrollado en el modelo se observa un costo total de inversión de por lo menos 138 millones de dólares, esto es debido a que en la actualidad el

mercado de bonos de carbono se ven reducidos respecto a años anteriores, ya que países industrializados se han dado de baja o no han renovado cuentas con lo consensuado en el protocolo de Kioto, que es una participación abierta para la disminución de emisiones de CO2, impulsada por un incentivo económico a quienes eviten emitir mayores cantidades de CO2, y sancionar a quienes emitan mayor cantidad de CO2 al ambiente, esto hace que el precio de la tonelada de CO2 evitada esté alrededor de los 2 dólares aproximadamente. En el costo total del proyecto influye fuertemente la tasa de financiamiento que para la actualidad el banco del estado se maneja una tasa de entre 7 a 9% para proyectos de generación eléctrica mediante energías renovables.

Para el caso del escenario optimista se ha considerado tasas de financiamiento bajas de aproximadamente 5% que se puede dar por financiamiento extranjero, dentro de este escenario se considera un alza en el valor de las emisiones de CO2 evitadas en el medioambiente, debido a que según pronósticos o predicciones, todos los países deben tender a integrarse a los protocolos de disminución de emisiones de CO2 lo cual generara un flujo mayor de dinero en el mercado de los bonos de carbono, con un precio alrededor de los 50 dólares la tonelada de CO2 evitada, lo que por consecuencia nos da un costo total de inversión de aproximadamente 132 millones de dólares, lo cual tiene una diferencia considerable con el estado actual del modelo.

Para el caso del escenario pesimista se toma en cuenta al igual que en el caso del caso optimista un aumento en el valor de los certificados de carbono, haciendo el posible caso de que exista el aumento del valor, solo que este no sea su máximo esperado estando este valor en alrededor 15 dólares, dentro del escenario pesimista se analiza la posibilidad de una tasa de financiamiento de un 12%, con lo cual el costo total del proyecto geotérmico aumenta su valor a un pico de 146 millones de dólares, con lo cual podemos decir que aunque con respecto del estado actual los bonos de carbono aumenten su valor, la variable que afecta más directamente al valor del costo final del proyecto geotérmico en este caso es el porcentaje de la tasa de financiamiento.

4.4 Resultados utilizando criterios económicos del VAN y TIR

Al utilizar los criterios económicos de VAN y TIR, se hace una consideración adicional al modelo planteado, ya que, estos criterios se basan principalmente en los ingresos y egresos que tendría la central de generación geotérmica, durante su funcionamiento o tiempo de vida útil. Estos dos criterios son de importancia para evaluar proyectos y son usados para la toma de decisiones de inversión, puesto que nos indican si el mismo puede llegar hacer rentable o no.

Los ingresos que se obtendrían de esta planta serian únicamente el resultado de la venta de energía eléctrica, para lo cual se ha establecido un costo de 13.21

cUSD/kWh, según la Regulación No. CONELEC – 004/11, y los egresos están determinados por los costos de operación y mantenimiento. Con estos antecedentes se llegó a los siguientes resultados:

Según la tabla 6, en donde se muestran los resultados, se puede deducir que la inversión es rentable ya que el VAN tiene un valor positivo de $ 185, 450,373.36 y la TIR, 41,65% es superior a la tasa de rentabilidad exigida para este tipo de proyectos, 12%.

Tabla 6. Criterios de evaluación económica. Elaboración propia.

Criterios de Evaluación Económicos	
VAN	$ 185,450,373.36
TIR	41.65%

La figura 41; nos indica como varia la tasa interna de retorno TIR, según la capacidad del potencial, la cual nos muestra que mientras menor sea la capacidad del yacimiento mucho menor será la rentabilidad del proyecto geotérmico.

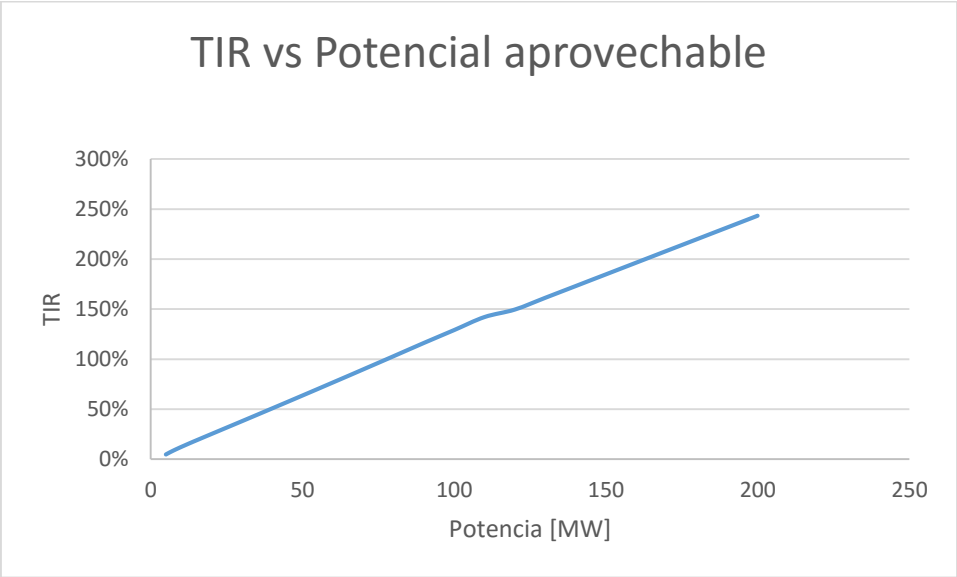


Figura 41. Tasa interna de retorno TIR vs., la capacidad del yacimiento geotérmico.

La figura siguiente, nos indica como varía el valor actual neto VAN, según la capacidad del potencial, la cual nos muestra una relación directamente proporcional, es decir, mientras menor sea la capacidad del yacimiento, menor será el valor actual neto.

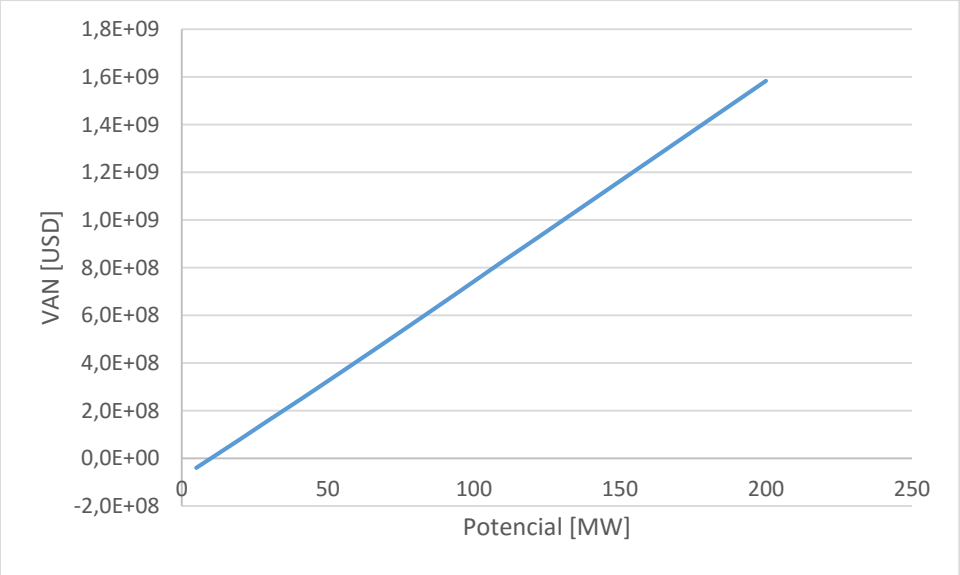


Figura 42. Valor actual Neto vs., la capacidad del yacimiento geotérmico.

Capítulo 5. Conclusiones

La Dinámica de Sistemas ha permitido analizar de manera conveniente la factibilidad de proyectos energéticos económicos, debido que permite entender, comprender y analizar las interrelaciones de las variables que afectan al costo total del proyecto y al costo de inversión, importantes para la toma de decisión; también a su vez nos permite generar escenarios para su posterior análisis.

De acuerdo a los resultados obtenidos que muestran los dos escenarios tanto optimista y pesimista del modelo se concluye que se cumple con el objetivo principal del trabajo de titulación: “Plantear un modelo de toma de decisiones para la implementación de plantas de generación eléctrica con energía geotérmica”.

Tomando en cuenta la rentabilidad que debe tener un proyecto de este tipo se recomienda que, en el Ecuador se debería invertir en energía geotérmica cuando el yacimiento geotérmico tenga un potencial superior a 12 MW, según los datos obtenido por el VAN y la TIR.

La situación energética eléctrica en el ecuador hasta la actualidad, está estructurada por dos fuentes de generación principalmente, de las cuales, el 47% pertenece a fuentes hidráulicas y 51 % pertenece a fuentes térmicas, el 2% restante corresponden a fuentes renovables como la eólica, fotovoltaica y biomasa. Para el caso particular de la geotermia el Ecuador

cuenta con un potencial de más de 682 MW aprovechables con fines de generación eléctrica.

De los yacimientos geotérmicos que se sabe pueden ser usados para la generación de energía eléctrica, se deberá usar plantas de vapor seco o de simple flash, ya que estos yacimientos son de alta entalpía, donde en el yacimiento puede predominar líquido o un vapor ligeramente sobrecalentado; y para dichas plantas se deberá usar turbinas de condensación para generar energía mecánica y así generar energía eléctrica mediante el generador eléctrico.

El modelo a seguir para implementar proyectos de generación eléctrica mediante energía geotérmica, se basa en la obtención de las variables que componen los aspectos tecnológicos, ambientales y económicos, los cuales se relacionan para obtener el costo total de inversión y del proyecto (ver anexo B); se debe plantear escenarios coherentes a la realidad que puede afrontar el país, en estos escenarios se crean a partir de la alteración de las variables anteriormente mencionadas, las variables que crean los escenarios optimistas y pesimistas asignadas para este proyecto como ya se ha mencionado con anterioridad son la tasa de financiamiento con un rango de 5 al 12%, y los certificados de carbono con un rango en sus costos de 2USD a 50USD, se analizan los datos obtenidos por el modelo creado en el software de Dinámica de Sistemas "Vensim" y conjuntamente con las fórmulas económicas realizadas en "Excel" obtenemos el VAN y la TIR y con lo especificado en el capítulo 3 sección 3.3.1 y sección 3.3.2, podremos saber si el proyecto es rentable o no, de serlo se tomaría la decisión de implementar el proyecto de generación eléctrica mediante energía geotérmica.

Se enfatiza en que el modelo dinámico generado en el software Vensim se complementa con las fórmulas económicas mediante Excel, lo cual hace que tengamos un modelo dinámico, entendible y compaginable con diferentes herramientas sistemáticas, lo cual nos ha dado como resultado un modelo de toma de decisiones aplicable para el Ecuador.

El costo de una planta geotérmica esta relaciona en función de muchas variables como lo son: estudios de pre factibilidad, instalaciones, costo de operación y mantenimiento, etc., pero una de estas variables que lo vuelve más sensible es la tasa de financiamiento. Misma que al presentar una tasa del 5% para un escenario optimista hace que los costos de la planta sean mucho menores al estado actual, y por consiguiente una tasa de 12% que se establece en el escenario pesimista presenta valores superiores al costo simulado en condiciones actuales.

Uno de los factores que influyen en la toma de decisiones para proyectos de generación renovable es el costo de emisiones evitadas de CO2, mientras mayores sean el valor de estos certificados o bonos de carbono mucho mayor será la utilidad que se obtenga a partir de la puesta en marcha de esta central de generación geotérmica.

Se debe recalcar la importancia de incluir la distancia de transmisión de energía eléctrica desde donde se encuentre el yacimiento geotérmico hasta la subestación más cercana, ya que el valor de transmisión aumenta proporcionalmente a medida que aumente la distancia en la que se encuentre la subestación más cercana, con precios cercanos a los 725 000 dólares por cada kilómetro instalado.

Trabajos futuros

Ampliar e identificar nuevas variables en el modelo de simulación, tomando en consideración factores como subsidios y condiciones sociopolíticas.

Considerar otros métodos para calcular el potencial de un yacimiento geotérmico, aplicando estas al modelo planteado y ver su comportamiento en el tiempo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] L. Jaramillo, D. Chamba "Una aproximación CTS a la implementación de la primera empresa de servicio eléctrico público en el Ecuador", 2009.

[2] D. Delgado, "Balance Energético Nacional 2015", Quito-Ecuador, 2015.

[3] Fanelli M. y H. Dickson, "Geothermal energy: utilization and technology", 2003.a ed., vol. I. Bangalore, India: Typeset by S R Nova Pvt. Ltd, 2003.

[4] R. Chiriboga y P. José, "Evaluación de las energías renovables no convencionales factibles de desarrollarse en el Ecuador", dic. 2009.

[5] S. Eskinazi, "Fluid Mechanics and Thermodynamics of Our Environment". Elsevier, 2012.

[6] M. Oleas y A. Javier, "Estudio de posibilidades geotérmicas en el área de Papallacta-Caldera Chacana-Ecuador", jul. 2012.

[7] P. Lara y A. Lucía, "Proyecto de una central de generación geotérmica en el Ecuador", Tesis, QUITO/EPN/2011, 2011.

[8] F. Andraca y J. Rodríguez, "Modelado inicial para yacimientos geotérmicos durante la etapa de exploración", Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F., 2012.

[9] J. Sanchez, L. Sanz, y L. Ocaña, "Evaluación del potencial de energía geotérmica. Estudio Tecnico", Madrid, 2011.

[10] L. J. Banyeras, "Energía geotérmica". Grupo Planeta (GBS), 2004.

[11] L. Mora y O. Enrique, "Análisis de Diversas Alternativas de Generación Eléctrica con Fuentes Geotermales en Chile", Repos. Académico - Univ. Chile, 2010.

[12] P. Qingneng, "Turbinas de vapor | Turbina de vapor de contrapresión", 27-abr-2016. [En línea]. Disponible en: http://qn-powertech.com/1-steam-turbine/183507. [Accedido: 27-abr-2016].

[13] J. Lopez, "Inspección de Integridad para Turbinas de Vapor en Centrales Termoeléctricas"2010.

[14] J. W. Forrester, "Industrial Dynamics—After the First Decade", Manag. Sci., vol. 14, n.o 7, pp. 398-415, mar. 1968.

[15] J. W. Forrester, "The beginning of system dynamics", McKinsey Q., pp. 4–17, 1995.

[16] H. Qudrat-Ullah y B. S. Seong, "How to do structural validity of a system dynamics type simulation model: The case of an energy policy model", Energy Policy, vol. 38, n.o 5, pp. 2216-2224, may 2010.

[17] N. Jara, "Influencia de las condiciones socioeconómicas y geográficas en la aplicación de políticas energéticas para la sustitución de refrigeradores domésticos.", Universidad Pontificia Bolivariana de Medellín, Medellín, Colombia, 2015.

[18] A. Ortiz, J. M. Sarriegi, y J. Santos, "Modelización de variables soft", Rev. Dinámica Sist., vol. 2, n.o 1, pp. 67–101, 2006.

[19] J. D. Sterman, "System Dynamics: systems thinking and modeling for a complex world", en Proceedings of the ESD Internal Symposium, 2002.

[20] Cedric Nathanaël Hance, "Factors affecting cost of power: - Factors Affecting Cost of Geothermal Power Development - August 2005", ago. 2005.

[21] M. González "Costo de financiamiento - SVS Educa. Superintendencia de Valores y Seguros. Gobierno de Chile." [En línea]. Disponible en: http://www.svs.cl/educa/600/w3-propertyvalue-1150.html. [Accedido: 27-abr-2016].

[22] R. Rodríguez y I. Darío, «La tasa social de descuento en el Ecuador», Pontif. Univ. Católica Ecuad., nov. 2006.

[23] L. Jhons "Enhanced Geothermal Systems | Department of Energy". [En línea]. Disponible en: http://energy.gov/eere/geothermal/enhanced-geothermal-systems-0. [Accedido: 27-abr-2016].

[24] SERCOP, [En línea]. Disponible en: https://www.compraspublicas.gob.ec/ProcesoContratacion/compras/PC/informacionProcesoContratacion2.cpe?idSoliCompra=Nm5KnfA6KmrFOSySXLXWZitEe91hwWLhVvh5XpMv7ao,. [Accedido: 29-may-2016].

[25] Centro de Comercio Internacional, "El cambio climático-Definición de los bonos de carbono", 28-abr-2016. [En línea]. Disponible en: http://www.intracen.org/guia-del-cafe/el-cambio-climatico/Definicion-de-los-bonos-de-carbono/. [Accedido: 28-abr-2016].

[26] J. Cárpatos "Emisiones de Carbono Precios históricos ", investing.com Español, 28-abr-2016. [En línea]. Disponible en: http://es.investing.com/commodities/carbon-emissions-historical-data. [Accedido: 28-abr-2016].

[27] R. Parra, "Factor de emisión de CO2 debido a la generación de electricidad en el Ecuador durante el periodo 2001–2011. Avances", 2013.

[28] D. Perez "Formas de generar energía". [En línea]. Disponible en: https://issuu.com/dilanpa/docs/dilan_paul_perez_coedova.docx. [Accedido: 28-abr-2016].

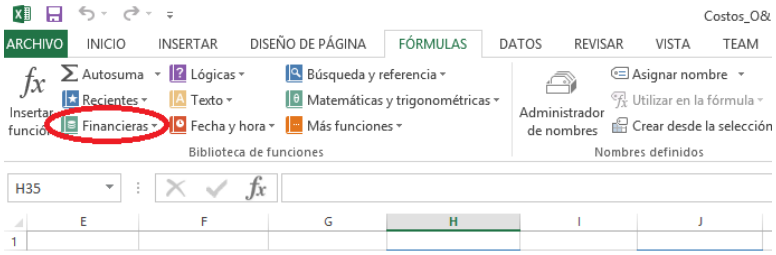
[29] N. S. Chain y R. S. Chain, "Preparación y evaluación de proyectos". McGraw-Hill Interamericana, 2003.

[30] C. B. Michael Gillenwater, "Internalizing carbon costs in electricity markets: Using certificates in a load-based emissions trading scheme", 2009, vol. 37, p. 299.

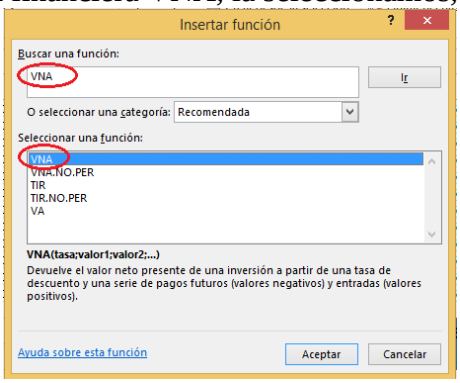
ANEXO A. Procedimiento de cálculo VAN y TIR

A continuación se muestra el procedimiento de cálculo para el VAN y la TIR utilizado la herramienta de Excel, la misma nos permita a través de sus fórmulas financieras abreviar el procedimiento de cálculo de estas variables:

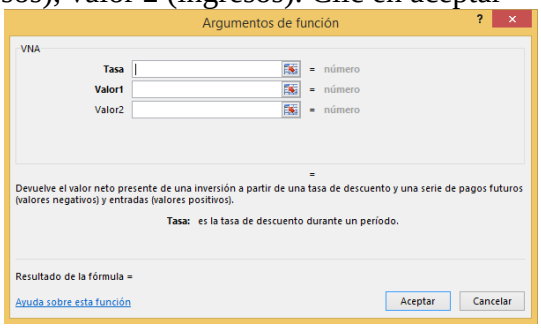
1) Ingresamos el programa Excel
2) Se coloca en dos columnas los valores de ingresos y egresos
3) En una nueva celda, en el módulo de fórmulas del programa elegimos el paquete financiero.

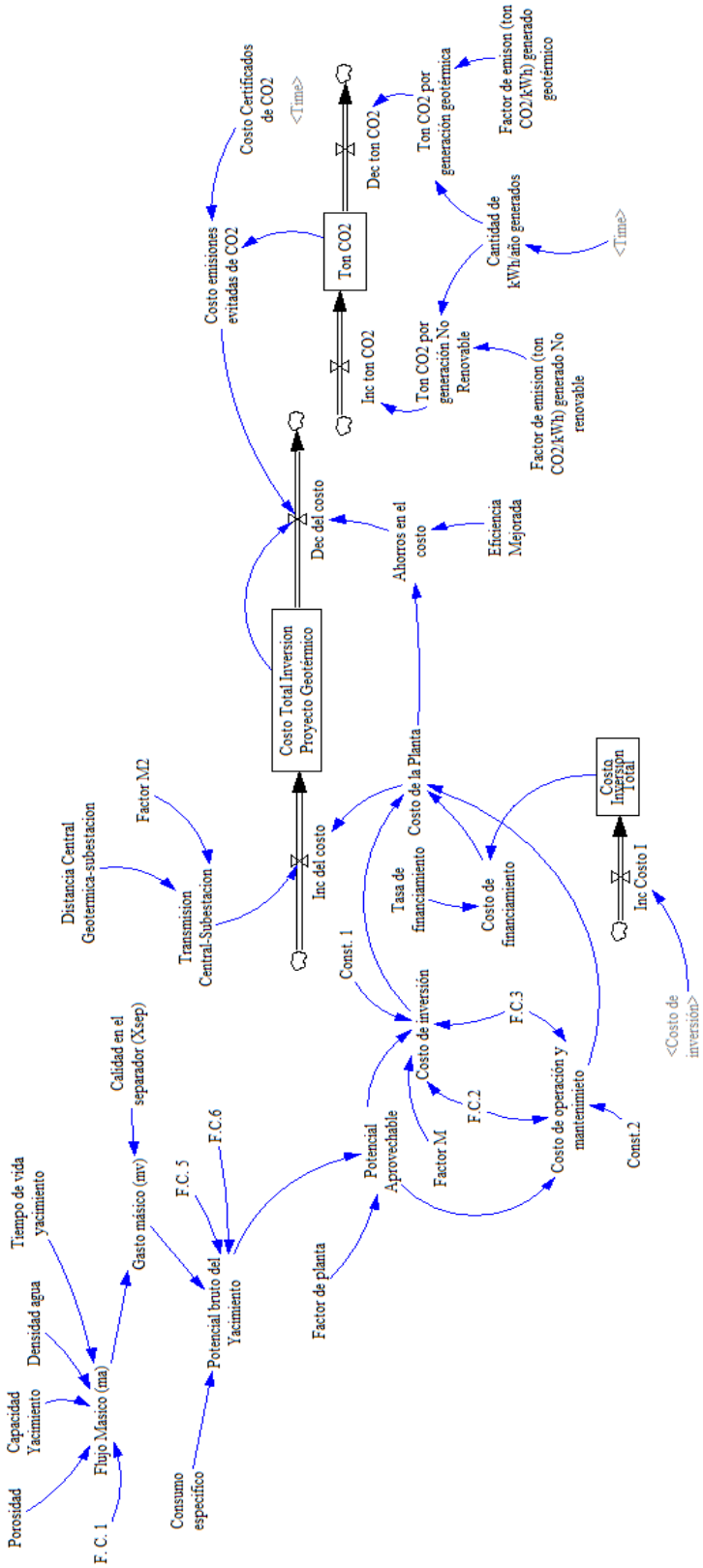


4) Buscamos la formula financiera VNA, la seleccionamos, damos clic en aceptar.



5) Se nos abrirá una nueva ventana donde colocaremos los valores que nos pide de tasa, valor 1 (egresos), valor 2 (ingresos). Clic en aceptar



6) Para el cálculo de la TIR, repetimos desde el paso 3 en una nueva celda y en vez de buscar VNA colocaremos TIR.

ANEXO B. Modelo Proyectos Geotérmicos para generación Eléctrica, usado Vensim